

إيان ستيوارت

حساب الكون بالأرقام

كيف تكشف الرياضيات عن حقيقة الكون

ترجمة الزهراء سامي

حساب الكون بالأرقام

كيف تكشف الرياضيات عن حقيقة الكون

تأليف

إيان ستيوارت

ترجمة

الزهراء سامي

مراجعة

هاني فتحي سليمان



حساب الكون بالأرقام

إيان ستيوارت

Calculating the Cosmos

Ian Stewart

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ١٧٥٣ ٨٣٢٥٢٢ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

تصميم الغلاف: يوسف غازي

الترقيم الدولي: ٨ ٢٩٠٥ ٥٢٧٣ ١ ٩٧٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠١٦.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٢.

المحتويات

مقدمة

«حسنًا، لقد حسبتُها.»

تلك كانت إجابةَ إسحاق نيوتن على إدموند هالي حين سأله عن الكيفية التي عرف بها أنَّ قانون التربيع العكسي يعني أنَّ مدارات الكواكب إهليلجية الشكل. وقد اقتبس هربرت ويسترن تيرنبول هذه الإجابة في كتابه «الرياضيون العظام».

لو كان ثمَّة كائن فضائي ذكي يراقب النظام الشمسي في الثاني عشر من نوفمبر عام ٢٠١٤، لشهد حدثًا محيرًا. فعلى مدار شهورٍ، ظلت آلةٌ صغيرة للغاية تتبع مذنَّبًا في مساره حول الشمس، وهي خاملةٌ ساكنة. وفجأة تيقَّظت الآلة وتلفَّظت آلةً أصغر منها. انحدرت هذه الآلة الأصغر باتِّجاه السطح الأسود الفحمي للمذنَّب، وارتطمَت به، وارتدت. وحين توقَّفت أخيرًا، كانت مقلوبة على جانبها، وعالقة في جرف صخري.

ربما لم ينبهر الكائن الفضائي؛ إذ استنتج أنَّ الهبوط لم يجرِ على النحو المنشود، لكنَّ المهندسين المسئولين عن الآلتين كانوا قد حقَّقوا عملًا غيرَ مسبوق، وهو الهبوط بمسبار فضائي على مذنَّب. كانت الآلة الكبيرة هي «روزيتا»، والصغيرة «فايلي»، والمذنَّب هو «تشوريوموف-جيراسيمنكو/بي ٦٧». كانت المهمة من تنفيذ وكالة الفضاء الأوروبية، وقد استغرقت الرحلةُ وحدها ما يزيد عن ١٠ أعوام. وبالرغم من الهبوط المتخبِّط، حقَّقت «فايلي» معظمَ أهدافها العلمية، وأرسلت بيانات هامة. وتستمر «روزيتا» في أداء المهمة على النحو المخطَّط له.

لمَ الهبوط على مذنَّب؟ لأنَّ المذنَّبات مثيرة للاهتمام في حدِّ ذاتها، وأي شيء نكتشفه عنها يُعد إضافة مفيدة لأساس العلم. وعلى مستوًى عمليٍّ بدرجة أكبر، فالمذنَّبات تقترب من

الأرض في بعض الأحيان وسيسبب الاصطدام بها ضررًا بالغًا؛ لذا فمن الحكمة أن نعرف ما تتكوَّن منه. ذلك أننا نستطيع تغيير مدار جسم صلب باستخدام صاروخ أو قذيفة نووية، لكنَّ جسمًا إسفنجيًّا لينًا قد ينكسر ويزيد الأمر سوءًا. وثمَّة سبب ثالث أيضًا، وهو أنَّ المذنَّبات تحتوي على موادَّ يعود تاريخها إلى أصول النظام الشمسي؛ ومن ثمَّ يمكنها أن تمدَّنا بمعلومات مفيدة عن كيفية نشأة عالمنا.

يعتقد علماء الفلك أنَّ المذنَّبات كرات ثلجية متسخة، جليد مغطًّى بطبقة رقيقة من الغبار. وقد تمكَّن المسبار «فايلي» من تأكيد هذا الاعتقاد فيما يتعلق بالمذنَّب «٦٧ بي» قبل أن تفرغ بطارياته ويصمت. إذا كانت الأرض قد تكوَّنت على مسافتها الحالية من الشمس، فإنها تحتوي على قدرٍ من المياه أكبرَ مما كان ينبغي أن تحتوي عليه. فمن أين أتى هذا القدر الإضافي من المياه؟ ثمَّة إجابة محتملة مثيرة للاهتمام تتمثَّل في انهيال ملايين المذنَّبات عند تكوُّن النظام الشمسي. ذاب الجليد ووُلِدت المحيطات. ربما يكون من المفاجئ أنه توجد طريقة لاختبار هذه النظرية. فالماء يتكوَّن من الهيدروجين والأكسجين. ويوجد الهيدروجين على ثلاثة أشكال ذرية متمايزة هي ما يُعرف بالنظائر، وهي تحتوي على العدد نفسه من البروتونات والإلكترونات (واحد من كلٍّ منها)، لكنها تختلف في عدد النيوترونات. لا تحتوي ذرة الهيدروجين العادية على أية نيوترونات، وتحتوي ذرة هيدروجين الديوتيريوم على نيوترون واحد، وتحتوي ذرة هيدرجين التريتيوم على اثنين من النيوترونات. إذا كانت محيطات الأرض من المذنَّبات، فيجب أن تكون نسب هذه النظائر الموجودة في المحيطات والقشرة الأرضية التي تحتوي صخورها أيضًا في تركيبها الكيميائي على كميات كبيرة من المياه، مشابهةً لنسب النظائر الموجودة في المذنَّبات.

يوضِّح تحليل «فايلي» أنَّ مذنَّب «٦٧ بي» يحتوي على نسبة من الديوتيريوم أكبر كثيرًا من تلك الموجودة في الأرض. ينبغي الحصول على بيانات أكثرَ من المزيد من المذنَّبات للتأكد من ذلك، لكن نظرية النشأة المذنَّبية للمحيطات بدأت تتزعزع. وتمثِّل الكويكبات احتمالًا أفضل.

ليست بعثة «روزيتا» سوى مثال على قدرة البشر المتزايدة على إرسال الآلات إلى الفضاء إما للاستكشاف العلمي أو للاستخدامات اليومية. وقد وسَّعت هذه التقنية الجديدة من طموحاتنا العلمية. فمسابير الفضاء التي ابتكرناها قد زارت الآن جميع الكواكب في النظام الشمسي وبعض الأجسام الأصغر، وأرسلت إلى الأرض صورًا لها.

حدث التقدُّم سريعًا. هبط رواد الفضاء الأمريكيون على القمر عام ١٩٦٩. وفي عام ١٩٧٢، انطلقت مركبة الفضاء «بايونير ١٠» وزارت المشتري، ثم تابعت طريقها



مذنَّب «٦٧ بي» «البطة المطاطية»، بتصوير «روزيتا».

خارج النظام الشمسي. تبعتها «بايونير ١١» عام ١٩٧٣، وزارت زحل أيضًا. وفي عام ١٩٧٧، انطلقت المركبتان «فوياجر ١» و«فوياجر ٢» لاستكشاف هذه العوالم وحتى الكواكب الأبعد: أورانوس ونبتون. ثمَّة مركبات أخرى قد أطلقها العديد من الدول المختلفة والمجموعات الدولية، وزارت عطارد والزهرة والمريخ. بل إنَّ بعضها «هبط» على الزهرة والمريخ، وأرسل إلى الأرض معلوماتٍ ثمينة. وبينما أكتب في ٢٠١٥، توجد خمسة مسبارات مدارية [1] ومركبتان [2] سطحيتان تستكشف المريخ؛ فالمركبة «كاسيني» في مدارٍ حول زحل، والمركبة الفضائية «ذا داون» تدور حول الكويكب السابق سيريس، الذي ترقَّى حديثًا في التصنيف إلى كوكب قزم، والمركبة الفضائية «نيو هورايزونز» قد مرَّت لتوها بالكوكب القزم الأشهر في النظام الشمسي: بلوتو، وأرسلت صورًا رائعة له. وسوف تساعد بياناتها في حل ألغاز هذا الجسم المحيِّر وأقماره الخمسة. لقد أوضحت بالفعل أنَّ بلوتو أكبر قليلًا من إريس، وهو كوكب قزم أبعد كان يُعتقد سابقًا أنه أكبرُ الكواكب القزمة. أُعيد تصنيف بلوتو في فئة الكواكب القزمة لاستبعاد إريس من رتبة الكواكب. ونحن نكتشف اليوم أنه ما كان عليهم أن يتجشموا هذا العناء.

لقد بدأنا أيضًا في استكشاف أجسامٍ أصغر لكنها على الدرجة نفسها من الروعة، مثل الأقمار والكويكبات والمذنَّبات. ربما لا يكون هذا الاكتشاف على مستوى «ستار تريك»، لكنَّ الأفق الأخير ينفتح.

إنَّ استكشاف الفضاء من العلوم الأساسية، وبالرغم من أنَّ الاستكشافات الجديدة عن الكواكب تثير اهتمام معظمنا، يفضِّل البعض أن تؤدي مساهماتهم الضريبية إلى فوائدَ عملية أكثر. وفما يتعلَّق بالحياة اليومية، فإنَّ قدرتنا على تشكيل نماذج رياضية دقيقة للأجسام التي تخضع لتأثير الجاذبية قدَّمت للعالم الكثير من العجائب التكنولوجية التي تعتمد على الأقمار الاصطناعية، مثل البث التليفزيوني بالأقمار الاصطناعية، وشبكة الهاتف الدولية التي تتمتَّع بالكفاءة، والأقمار الاصطناعية المخصصة للأرصاد الجوية، والأقمار الاصطناعية التي تتابع الشمس ترقبًا للعواصف المغناطيسية، والأقمار الاصطناعية التي تراقب البيئة وتضع خرائط الكرة الأرضية، وحتى أجهزة الملاحة في السيارات، وذلك باستخدام نظام تحديد المواقع العالمي.

إنَّ هذه الإنجازات كانت ستذهل أجيالًا سابقة. فحتى في ثلاثينيات القرن العشرين، كان معظم البشر يعتقدون أنه ما من إنسانٍ سيقف على القمر أبدًا. (واليوم لا يزال الكثيرون من السذَّج الذين يؤمنون بنظرية المؤامرة يعتقدون أنَّ أحدًا لم يفعل بالفعل، لكن لا أريد أن أتطرَّق إلى الحديث عن هذا). لقد جرت نقاشاتٌ محتدمةٌ بشأن احتمالية السفر في الفضاء أصلًا.[3] أصرَّ البعض أنَّ الصواريخ لن تعمل في الفضاء لأنه «ما من شيء يدفعها»؛ وذلك لعدم معرفتهم بقانون نيوتن الثالث للحركة؛ لكلِّ فعل ردٌّ فعل مساوٍ له في المقدار ومعاكس له في الاتجاه.[4]

أصرَّ العلماء الجادون بقوة على أنَّ الصاروخ لن يعمل أبدًا لأنك ستحتاج إلى الكثير من الوقود لرفع الصاروخ، وستحتاج إلى وقود أكثر لرفع الوقود، ثم وقود أكثر وأكثر لرفع «ذاك» ... وذلك حتى حين تجسِّد صورة في «هيو لونج جينج» الصيني (كتيب تنين النار) الذي ألَّفه جياو يو، أحدَ تنانين النار، الذي يُعرف أيضًا باسم الصاروخ المتعدد المراحل. كان هذا السلاح البحري الصيني يستخدم محركات صاروخية معزَّزة متساقطة لإطلاق مرحلة علوية على شكل رأس تنين محمَّلة بأسهم النيران التي كانت تنطلق من فمه. أجرى كونراد هاس أول تجربة أوروبية للصواريخ المتعددة المراحل عام ١٥٥١. لقد أوضح رواد علم الصواريخ في القرن العشرين أنَّ المرحلة الأولى من الصاروخ المتعدد المراحل ستكون قادرة على رفع المرحلة الثانية ووقودها، مع «طرح» كل الوزن الزائد للمرحلة الأولى التي



في الرابع عشر من يوليو ٢٠١٥، تمكَّن المسبار الفضائي التابع لناسا «نيو هواريزونز»، من إرسال هذه الصورة التاريخية لبلوتو إلى الأرض، وهي أول صورة تظهر فيها معالم واضحة للكوكب القزم.

استُنفِدت الآن. ونشر قسطنطين تسيولكوفسكي حسابات واقعية مفصلة بشأن استكشاف النظام الشمسي في عام ١٩١١.

حسنًا، لقد وصلنا إلى القمر برغم المنكرين، وباستخدام الأفكار ذاتها التي كانوا أضيقَ أفقًا من تأمُّلها. إننا لم نستكشف سوى إقليمنا المحلي في الفضاء حتى الآن، وهو لا يكاد يكون شيئًا على الإطلاق مقارنةً بمساحة الكون الشاسعة. لم نهبِط بالبشر على كوكب آخر حتى الآن، وحتى أقرب النجوم يبدو بعيد المنال تمامًا. وفي ضوء التكنولوجيا المتوفرة الآن، سيستغرق الأمر قرونًا كي نصل إلى هناك حتى إن تمكَّنا من بناء سفينة نجمية يُعوَّل عليها. غير أننا في طريقنا.

إنَّ هذا التقدُّم في استكشاف الفضاء واستخدامه لا يعتمد على التقنيات البارعة فحسب؛ بل يعتمد أيضًا على سلسلة طويلة من الاكتشافات العلمية التي يعود تاريخها إلى البابليين القدماء على أقلِّ تقدير قبل ثلاثة آلاف عام. فالرياضيات تكمن في صميم هذا التقدُّم.

والهندسة مهمة أيضًا دون شك، وكذلك كان من الضروري التوصُّل إلى اكتشافات في العديد من المجالات العلمية الأخرى قبل أن نتمكَّن من صناعة المواد اللازمة وتجميعها إلى مسبار فضائي يعمل، لكني سأركِّز على كيفية تحسين الرياضيات معرفتَنا بالكون.

إنَّ قصة استكشاف الفضاء تسير جنبًا إلى جنب مع قصة الرياضيات منذ أقدم العصور. فقد ثبت أنَّ الرياضيات أساسية لفهم الشمس والقمر والكواكب والنجوم، وتلك المجموعة الشاسعة من الأجسام الأخرى التي تشكِّل الكون على نطاقه الواسع. فعلى مدار آلاف الأعوام، ظلت الرياضيات هي أكثر الطرق فعاليةً في فَهْم الأحداث الكونية وتسجيلها والتنبؤ بها. لقد كانت الرياضيات في بعض الثقافات مثل ثقافة الهند القديمة قرابة العام ٥٠٠ ميلاديًّا، فرعًا من علم الفلك بالفعل. وبالمقابل، أثَّرت بعض الظواهر الفلكية في تطوُّر الرياضيات على مدار ثلاثة آلاف عام؛ إذ ألهمت كل شيء بداية من تنبؤات البابليين بالكسوف والخسوف وصولًا إلى حساب التفاضل والتكامل والفوضى وانحناء الزمكان.

في بادئ الأمر، كان الدور الفلكي الأساسي للرياضيات هو تسجيل الملاحظات وإجراء حسابات مفيدة بشأن بعض الظواهر مثل الكسوف الشمسي، حيث يحجب القمر الشمس مؤقتًا، أو الخسوف القمري حيث يحجب ظل الأرض القمر. ومن خلال التفكير في هندسة النظام الشمسي، أدرك رواد علم الفلك أنَّ الأرض تدور حول الشمس، حتى وإن كان يبدو لنا من الأرض أنَّ العكس هو ما يحدث. جمع القدماء أيضًا الملاحظات مع الهندسة لتقدير حجم الأرض والمسافة بينها وبين القمر والشمس.

بدأت الأنماط الفلكية الأعمق تتضح قرابة العام ١٦٠٠، حين اكتشف يوهانس كيبلر في مدارات الكواكب ثلاث صور رياضية منتظمة أو «قوانين». وفي عام ١٦٧٩، أعاد إسحاق نيوتن تأويل قوانين كيبلر لصياغة نظرية طموحة لا تكتفي بوصف حركة كواكب النظام الشمسي فحسب؛ بل تصف حركة «أي» نظام من الأجسام السماوية. كانت تلك هي نظرية الجاذبية، وهي أحد الاكتشافات الأساسية في كتابه الذي غيَّر العالم «الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية». إنَّ قوانين نيوتن للجاذبية تصف الكيفية التي يجذب بها أيُّ جسم في الكون أيَّ جسم آخر.

من خلال الجمع بين الجاذبية وبعض القوانين الرياضية الأخرى بشأن حركة الأجسام، والتي كان جاليليو قد مهَّد الطريق لها قبل قرن، فسَّر نيوتن العديد من الظواهر السماوية وتنبَّأ بها. وبصورة أعم، غيَّر نيوتن طريقةَ تفكيرنا عن العالم الطبيعي فشكَّل ثورةً علمية لا تزال تتقدَّم حتى اليوم. لقد أوضح نيوتن أنَّ الظواهر الطبيعية (غالبًا) ما

تحكمها الأنماط الرياضية، ومن خلال فهمنا لهذه الأنماط، يمكن تحسين فهمنا للطبيعة. وفي عصر نيوتن، فسَّرت القوانين الرياضية ما كان يحدث في السماء، لكنها لم توفِّر استخدامات عملية مهمة إلا في مجال الملاحة.

كل ذلك تغيَّر حين دار القمر الاصطناعي «سبوتنك» التابع للاتحاد السوفييتي السابق في المدار الأرضي المنخفض عام ١٩٥٧، مطلِقًا بذلك إشارة البدء لسباق الفضاء. إذا كنت تشاهد مباريات كرة القدم على محطات التلفاز الفضائية، أو تشاهد الأوبرا أو البرامج الكوميدية أو البرامج الوثائقية العلمية، فأنت تجني فائدة عملية من أفكار نيوتن.

في بادئ الأمر، أدَّت نجاحاته إلى رؤية الكون بصفته كونًا منتظمًا كالساعة، وكل شيء فيه يتبع بمهابة مسارًا قد وُضِع له في بداية الخلق. فكان يُعتقد على سبيل المثال بأنَّ النظام الشمسي قد خُلِق في الحالة التي هو عليها الآن، مع وجود الكواكب نفسها التي تتحرَّك في مداراتها شبه الدائرية ذاتها. لا شك بأنَّ كل شيء تغيَّر بعض الشيء؛ فقد أوضحت ذلك اكتشافات هذه الفترة فيما يتصل بالملاحظات الفلكية. بالرغم من ذلك، فقد كان ثمَّة اعتقاد شائع بأنَّ شيئًا لم يتغيَّر أو سيتغيَّر بدرجة كبيرة على مدار دهور عديدة. فوفقًا للعقيدة الأوروبية، لم يكن من الوارد قطُّ أنَّ الخلق المثالي للإله كان يمكن أن يكون مختلفًا في الماضي. واستمرت هذه الرؤية الميكانيكية لكونٍ منتظم يمكن التنبؤ به على مدار أكثر من ثلاثة قرون.

غير أنها لم تَعُد سائدة الآن. فالابتكارات الحديثة في الرياضيات مثل نظرية الفوضى، مع أجهزة الكمبيوتر القوية الموجودة لدينا اليوم، والتي تستطيع حساب الأعداد الوثيقة الصلة بسرعة غير مسبوقة، قد غيَّرت رؤيتنا للكون تغييرًا عظيمًا. يظل النموذج المنتظم للنظام الشمسي صالحًا على مدار فترات قصيرة من الوقت، وعادة ما تُعد المليون عام فترةً قصيرة في علم الفلك. لكنَّ فناءنا الخلفي الكوني قد اتضح الآن أنه مكان انتقلت فيه العوالم من مدار إلى آخر، وسوف تنتقل. أجل، توجد فترات طويلة من السلوك المنتظم، لكنها تُقطَع بين الحين والآخر بدفقات من النشاط الجامح. فالقوانين الثابتة التي أدَّت إلى ظهور مفهوم كون الساعة، يمكن أيضًا أن تتسبَّب في حدوث تغييرات مفاجئة وسلوك شديد الاضطراب.

إنَّ التصورات التي يتخيَّلها علماء الفلك اليوم غالبًا ما تكون درامية. فخلال تكوُّن النظام الشمسي على سبيل المثال، تصادمت عوالم بأكملها مخلِّفةً نتائج مروعة. وسوف

تفعل ذلك مجددًا في المستقبل البعيد على الأرجح؛ فثمَّة احتمال صغير أن يهلك عطارد أو الزهرة، لكننا لا نعرف أيهما على وجه التحديد. ربما يهلك كلاهما، وربما يأخذان كوكبنا معهما. وتصادم مثل هذا قد أدَّى إلى تكوُّن القمر على الأرجح. يبدو الأمر كما لو أنه ضربٌ من ضروب الخيال العلمي، وهو كذلك بالفعل، لكنه من النوع الأفضل على الإطلاق؛ ذلك النوع «المحكم» من الخيال العلمي الذي لا يتجاوز العلوم المعروفة إلا فيما يتعلَّق بالاختراعات الجديدة المذهلة. غير أنه ما من اختراع مذهل هنا؛ بل اكتشاف رياضي غير متوقَّع فحسب.

أثْرَت الرياضيات فهمنا عن الكون على جميع النطاقات: منشأ القمر وحركته، وحركات الكواكب وتكوينها وأقمارها التابعة، وتعقيدات الكويكبات والمذنَّبات وأجسام حزام كايبر، وتلك الرقصة السماوية الرزينة التي يؤديها النظام الشمسي بأكمله. لقد علمتنا كيف أنَّ التفاعلات مع المشتري يمكن أن تلقي بالكويكبات في اتجاه المريخ، ومن ثمَّ الأرض، وعلمتنا أيضًا السبب في أنَّ زحل ليس وحيدًا في امتلاك الحلقات وكذلك كيفية تشكُّلها في الأساس، وكذلك السبب في تصرُّفها على النحو الذي تتصرَّف به، بضفائرها وموجاتها و«أحزمتها» الدوارة الغريبة. لقد أرتنا كيف يمكن لحلقات أحد الكواكب أن تلفظ أقمارًا، واحدًا تلو الآخر.

لقد تراجع نمط كون الساعة أمام نمط كون الألعاب النارية.

من منظور كوني، ليس النظام الشمسي سوى مجموعة واحدة تافهة من الصخور من بين مليارات الملايين من المجموعات الأخرى. وحين نتأمَّل الكون على نطاق أكبر، تؤدي الرياضيات دورًا أكثر أهمية. فنادرًا ما يكون إجراء التجارب ممكنًا وتُعد المشاهدات المباشرة أمرًا صعبًا؛ لذا نضطر إلى استنتاج استدلالات غير مباشرة بدلًا من ذلك. وغالبًا ما يهاجم الأشخاص المناهضون للعلم هذه السمة باعتبارها موطنَ ضعف. وحقيقة الأمر أنَّ القدرة على استنتاج أشياءَ لا نستطيع ملاحظتها مباشرةً من أعظم مواطن القوة في العلم. لقد أُثبِت وجود الذرات بصورة حاسمة قبل أن تمكِّننا المجاهر الحاذقة من رؤيتها بفترة طويلة، وحتى بعد اختراع المجاهر، نجد أنَّ «رؤيتها» تعتمد على سلسلة من الاستدلالات بشأن كيفية تشكُّل الصور المعنية.

تمثِّل الرياضيات محركًا قويًّا للاستدلال؛ فهي تتيح لنا استنباط «نتائج» فرضيات بديلة من خلال تحري دلالاتها المنطقية. وعند دمجها مع الفيزياء النووية، والتي هي

رياضية للغاية في حد ذاتها، فإنها تساعدنا على شرح ديناميكيات النجوم، بأنواعها الكثيرة، وتركيباتها الكيميائية والنووية المختلفة، ومجالاتها المغناطيسية المتموجة وبقعها الشمسية المظلمة. وهي تقدِّم معلومات عن نزعة النجوم لتشكيل مجموعات في المجرات الشاسعة، بينما تفصل بينها مساحات أضخم من الفراغ، وتفسِّر السبب في اتخاذ المجرات لمثل هذه الأشكال المثيرة للاهتمام. وتخبرنا أيضًا بسبب تجمُّع المجرات لتشكيل عناقيد مجرية تفصل بينها مساحات أضخم وأضخم من الفراغ.

ثمَّة نطاق أكبر حتى من ذلك، وهو نطاق الكون بأكمله. وهذا هو علم الكونيات. في هذا العلم نجد أنَّ مصدر الإنسانية للإلهام العقلي رياضي بالكامل تقريبًا. ذلك أننا نستطيع رصد ملاحظات لبعض جوانب الكون، لكننا لا نستطيع إجراء التجارب عليه ككل. وتساعدنا الرياضيات في تأويل الملاحظات؛ إذ تتيح لنا عقدَ مقارنات بصيغة «ماذا لو» بين النظريات البديلة. بالرغم من ذلك، فحتى هنا كانت نقطة البدء أقربَ إلى الوطن. فقد حلَّت نظرية النسبية التي وضعها ألبرت أينشتاين، واستُبدِل فيها منحنى الزمكان بالجاذبية، محل الفيزياء التي وضعها نيوتن. كان القدماء من علماء الهندسة والفلاسفة سيؤيدون ذلك؛ فقد اختُزِل علم الحركة إلى الهندسة. رأى أينشتاين تحقُّق نظرياته عن طريق اثنين من توقُّعاته: تغيُّرات معروفة في مدار عطارد لكنها محيرة، وانحناء الضوء بفعل الشمس الذي لوحِظ في كسوف شمسي عام ١٩١٩. غير أنه لم يكن ليدرك قطُّ أنَّ نظريته ستؤدي إلى اكتشاف بعضٍ من الأجسام الأكثر غرابة في الكون بأكمله، وهي الثقوب السوداء البالغة الضخامة حتى إنَّ الضوء لا يستطيع الهرب من قوة جاذبيتها.

ولا شك في أنه لم يدرك إحدى النتائج المحتملة لنظريته: الانفجار العظيم. إنَّ هذا هو الاقتراح القائل بأنَّ الكون نشأ من نقطة واحدة في وقتٍ ما في الماضي البعيد قبل ما يقرب من ١٣٫٨ مليار عام وفقًا للتقديرات الحالية، وذلك في انفجار ضخم. غير أنَّ الزمكان نفسه هو ما انفجر، ولم ينفجر شيء آخر بداخله. كان أول دليل على هذه النظرية هو اكتشاف إدوين هابل لتمدُّد الكون. إذا عُدتَ بالماضي إلى الوراء، فستجد أنَّ كل شيء ينهار إلى نقطة واحدة، ثم أعدْ بدء الزمن من جديد في الاتجاه المعتاد وستصل إلى هذا المكان وهذا الزمان.

عبَّر أينشتاين عن أسفه على أنه كان يمكن أن يتنبأ بهذا لو أنه صدَّق معادلاته. وهذا هو ما يجعلنا نثق بأنه لم يتنبأ به.

في العلوم، تفتح الإجابات الجديدة ألغازًا جديدة. وتُعد المادة المظلمة من أعظم هذه الألغاز، وهي نوع جديد تمامًا من المادة يبدو أنه ضروري كي تتوافق ملاحظاتنا عن كيفية

دوران المجرات مع فهمنا للجاذبية. بالرغم من ذلك، فقد باءت جميع محاولات البحث عن المادة المظلمة بالفشل في الكشف عنها. علاوةً على ذلك، ثمَّة عاملان آخران تلزم إضافتهما إلى نظرية الانفجار العظيم الأصلية لفهم الكون. أحد هذين العاملين هو التضخم، وهو تأثير قد أدَّى إلى زيادة حجم الكون الأولي بمقدار هائل على مدار فترة زمنية في غاية الضآلة. ويُعد التضخم ضروريًّا لتفسير السبب في أنَّ توزيع المادة في كون اليوم منتظم إلى حدٍّ كبير، وإن لم يكن منتظمًا تمامًا. وأما العامل الآخر فهو الطاقة المظلمة، تلك القوة الغامضة التي تتسبَّب في تمدُّد الكون بمعدل أسرع.

تقبَّل غالبية علماء الكونيات نظرية الانفجار العظيم، بشرط دمج هذه العوامل الثلاثة الإضافية — المادة المظلمة، والتضخم، والطاقة المظلمة — في النظرية. غير أنَّ كلًّا من هذه الكيانات الغامضة الخارقة يأتي بمجموعته الخاصة من المشكلات المزعجة. لم يَعُد علم الكونيات الحديث آمنًا مثلما كان قبل عَقد من الزمان، وربما تكون ثمَّة ثورة في الطريق.

لم يكن قانون الجاذبية الذي وضعه نيوتن أول نمط رياضي أمكن تمييزه في السماء، لكنه بلوَر النهج بأكمله وتجاوز كلَّ ما أتى قبله بدرجة كبيرة. وذلك من الموضوعات الأساسية والاكتشافات الرئيسة التي تكمن في صميم الكتاب الذي بين أيدينا. يتمثَّل هذا المحور الأساسي فيما يلي: توجد أنماط رياضية في حركات الأجسام السماوية والأرضية وبنيتها، بدايةً من أصغر جزيئات الغبار إلى الكون بأكمله. إنَّ فهم هذه الأنماط لا يمكِّننا من تفسير الكون فحسب؛ بل استكشافه أيضًا، والاستفادة منه، وحماية أنفسنا منه.

يمكن القول بأنَّ الإنجاز الأعظم هو إدراك «وجود» الأنماط. بعد ذلك، تعرف ما يجب أن تبحث عنه، وبالرغم من أنَّ تحديد الإجابات قد يكون صعبًا، تصبح المعضلات مسألةً تقنية فحسب. غالبًا ما يكون علينا ابتكار الأفكار الرياضية الجديدة تمامًا، ولست أزعم أنَّ ذلك بالأمر السهل أو المباشر. فتلك مباراة طويلة وهي لا تزال مستمرة حتى الآن.

حفَّز نهج نيوتن أيضًا استجابة قياسية. ففور أن يخرج أحدث الاكتشافات إلى النور، يبدأ علماء الرياضيات في التساؤل عمَّا إذا كان من الممكن لفكرةٍ مشابهة أن تحل مشكلات أخرى. فالرغبة الشديدة في جعل كل شيء أكثر تعميمًا، متعمقةٌ في الروح الرياضية. وليس من الصواب أن نحمِّل نيكولا بورباكي[5] و«الرياضيات الجديدة» مسئولية ذلك؛ فهي تعود إلى عصر إقليدس وفيثاغورس. ومن هذه الاستجابة، وُلِدت الفيزياء الرياضية. طبَّق معاصرو نيوتن، لا سيما في أوروبا بصفة أساسية، المبادئ نفسها التي كانت قد سبرت

أغوار الكون، لفهم الحرارة والضوء والمرونة، ثم الكهربية والمغناطيسية فيما بعد. ودوَّت الرسالة بوضوح أكبر:

«ثمَّة قوانين في الطبيعة.
وهي قوانين رياضية.
يمكن أن نجدها.
ويمكن أن نستخدمها.»

لم يكن الأمر بتلك السهولة بالطبع.

الفصل الأول

الجذب عن بُعد

«ماكافيتي، ماكافيتي، ما مِن أحد يشبه ماكافيتي،
لقد خرق جميع القوانين البشرية؛ بل إنه يخرق قانون الجاذبية.»

توماس ستيرنز إليوت، «كتاب الجُرَذ
العجوز عن القطط العملية»

لمَ تقع الأشياء؟

بعضها لا يقع. ماكافيتي لا يقع بالطبع. وكذلك لا تقع الشمس أيضًا ولا القمر وكلُّ ما هو موجود «بالأعلى» في السماء تقريبًا. غير أنَّ الصخور تقع أحيانًا من السماء، مثلما اكتشفت الديناصورات للأسف. أما هنا بالأسفل، فإذا أردنا تحرِّي الدِّقة في وصف الأمر، فسوف نقول إنَّ الحشرات والطيور والوطاويط تطير، لكنها لا تبقى بالأعلى إلى أجلٍ غير مسمًّى. كلُّ ما عدا ذلك تقريبًا يقع، ما لم يمسك به شيء آخر. أما في السماء، فلا شيء يمسك بالأشياء هناك، ومع ذلك لا تقع.

تبدو الأمور بالأعلى مختلفة جدًّا عمَّا هي عليه هنا بالأسفل.

تطلَّب الأمر مسحةً من العبقرية لإدراك أنَّ ما يتسبَّب في سقوط الأجسام الأرضية هو تحديدًا ما يمسك بالأجسام السماوية أن تقع. عقد نيوتن مقارنةً شهيرة شبَّه فيها القمر بتفاحةٍ تقع، وأدرك أنَّ القمر يظل بالأعلى لأنه على العكس من التفاحة، يتحرَّك جانبيًّا أيضًا.[1] والحق أنَّ القمر يسقط على الدوام، لكن سطح الأرض يسقط مبتعدًا عنه بالمعدَّل نفسه. إذن؛ يمكن للقمر أن يستمر في الوقوع إلى الأبد، لكنه يدور ويدور حول الأرض ولا يرتطم بها أبدًا.

لم يكن الاختلاف الحقيقي أنَّ التفاح يسقط بينما لا يسقط القمر. وإنما أنَّ التفاح لا يتحرَّك جانبيًّا بالسرعة الكافية لئلا يصطدم بالأرض.

كان نيوتن عالم رياضيات (وعالم فيزياء وكيمياء وباحثًا في الروحانيات)؛ لذا فقد أجرى بعض الحسابات لتأكيد فكرته الجذرية. أجرى حسابات للقوى التي لا بد أنها تؤثِّر في التفاحة والقمر لتجعل كلًّا منهما يتبع طريقه الخاص. ومع مراعاة الاختلاف بين كتلتيهما، اتضح أنَّ القوى متطابقة. أقنعه هذا أنَّ الأرض تسحب كلًّا من التفاحة والقمر إليها بالتأكيد. كان من الطبيعي افتراض أنَّ ذلك النوع نفسه من الجذب ينطبق على أي جسمَين أرضيَّين كانا أم سماويَّين. عبَّر نيوتن عن قوى الجذب هذه في معادلةٍ رياضية: قانون من قوانين الطبيعة.

من النتائج المهمة أنَّ الأمر لا يتلخَّص في جذب الأرض للتفاحة فحسب؛ بل إنَّ التفاحة تجذب الأرض أيضًا. وينطبق الأمر نفسه على القمر وكل شيء آخر في الكون. غير أنَّ تأثير التفاحة على الأرض شديد الصغر بدرجةٍ لا يمكن معها قياسه على عكس تأثير الأرض على التفاحة.

لقد كان هذا الاكتشاف انتصارًا ضخمًا؛ إذ مثَّل رابطًا دقيقًا وعميقًا بين الرياضيات وبين العالم الطبيعي. نتجت عنه أيضًا نتيجة أخرى مهمة، كان من السهل إغفالها في خضم الحسابات الرياضية التقنية، وهي أنه بالرغم من المظاهر، توجد تشابهات في بعض الجوانب الأساسية بين ما هو «هناك في الأعلى» وما هو «هنا في الأسفل». فالقوانين متطابقة. ما يختلف هو السياق الذي تنطبق فيه.

إننا ندعو قوة نيوتن الغامضة باسم «الجاذبية». ويمكننا حساب آثارها بدقة بالغة. غير أننا لا نفهمها حتى الآن.

لقد ظللنا نعتقد على مدار وقت طويل أننا نفهم الجاذبية. فقرابة العام ٣٥٠ قبل الميلاد، قدَّم الفيلسوف اليوناني أرسطو سببًا بسيطًا لسقوط الأشياء، وهو أنها تنشد موضع سكونها الطبيعي.

ولتجنب التبرير الدائري، شرح أيضًا معنى «الطبيعي». كان يرى أنَّ كل شيء يتألَّف من أربعة عناصر أساسية: الأرض والماء والهواء والنار. موضع السكون الطبيعي للأرض والماء هو مركز الكون، والذي يتطابق بالطبع مع مركز الأرض. والدليل على ذلك أنَّ الأرض لا تتحرَّك؛ فنحن نعيش عليها وكنا سنلاحظ بالتأكيد إذا كانت تتحرَّك. ولأنَّ الأرض أثقلُ

من المياه (فالأرض تغوص، أليس كذلك؟) نجد أنَّ المناطق الأكثر انخفاضًا تشغلها الأرض على شكل كرة. تليها بعد ذلك قشرة كروية من المياه، ثم قشرة كروية من الهواء (الهواء أخف من الماء: فالفقاقيع ترتفع). وفوق ذلك، لكن تحت الكرة السماوية التي تحمل القمر، يكمن عالم النار. وجميع الأجسام الأخرى تميل إلى الارتفاع أو السقوط وفقًا للنِّسب التي تحتوي عليها من هذه العناصر الأربعة.

أدَّت هذه النظرية بأرسطو إلى القول بأنَّ سرعة الجسم الساقط تتناسب مع وزنه (فالريش يسقط بدرجةٍ أبطأ من تلك التي يسقط بها الحجر) وتتناسب عكسيًّا مع كثافة الوسط المحيط (تسقط الحجارة في الهواء بأسرع مما تسقط في الماء). وبعد أن تصل إلى حالة سكونها الطبيعية، يظل الجسم هناك ولا يتحرَّك إلا أن تؤثِّر فيه قوةٌ ما.

وفقًا لتعريف النظريات، ليست هذه النظريات بالسيئة. وهي تتفق مع الخبرات الحياتية اليومية تحديدًا. فعلى مكتبي الآن وأنا أكتب، توجد نسخة أولى من رواية «ثلاثي الكواكب»، التي أقتبس منها حكمة الفصل الثاني. إذا تركتها وشأنَها فسوف تبقى حيث هي. وإذا أثَّرتُ عليها بقوةٍ ما، ودفعتها مثلًا، فسوف تتحرَّك بضعة سنتيمترات وتتباطأ في أثناء ذلك ثم تتوقَّف.

كان أرسطو على حق.

وهكذا بدا الأمر على مدارِ ما يقرب من ألفي عام. فبالرغم من أنَّ الفيزياء الأرسطية نوقِشت على نطاق واسع، فقد كانت الغالبية العظمى من المفكرين حتى نهاية القرن السادس عشر يَقبلون بها. من الاستثناءات على ذلك، الباحث العربي الحسن بن الهيثم الذي ناهض وجهة نظر أرسطو في القرن الحادي عشر استنادًا إلى أسسٍ هندسية. غير أنَّ الفيزياء الأرسطية لا تزال تتوافق حتى اليوم مع إدراكنا البديهي، بأكثر مما تتفق معه أفكار جاليليو ونيوتن التي حلَّت بدلًا منها.

وفقًا للتفكير الحديث، تنطوي نظرية أرسطو على ثغرات كبيرة. تتمثَّل إحدى هذه الثغرات في الوزن. لمَ تكون الريشة أخفَّ من الحجارة؟ ومنها أيضًا الاحتكاك. فلتفترض أنني وضعت نسختي من رواية «ثلاثي الكواكب» على إحدى حلبات التزلج على الجليد، ثم أعطيتها دفعة. ماذا سيحدث؟ سوف تصل إلى مسافة بعيدة، وستصل إلى مسافةٍ أكثر بُعدًا إذا وضعتها على زوجين من الزلاجات. فالاحتكاك يزيد من بطء حركة الجسم في وسط دِبْق لزج. يوجد الاحتكاك في كل شيء في حياتنا اليومية؛ ولهذا تتوافق الفيزياء الأرسطية مع إدراكنا البديهي أكثرَ مما تتوافق فيزياء جاليليو ونيوتن. لقد طوَّرت أدمغتنا نموذجًا داخليًّا للحركة والاحتكاك متأصلًا فيه.

صرنا نعرف الآن أنَّ الجسم يسقط باتجاه الأرض لأنَّ جاذبية الكوكب تسحبه. لكن ما هي الجاذبية؟ كان نيوتن يعتقد أنها قوة، لكنه لم يقدِّم تفسيرًا لكيفية ظهور القوة. لقد كانت «موجودة» فحسب. ويظهر تأثيرها عن بُعد مع عدم وجود شيء في المنتصف. لم يشرح أيضًا كيفية تنفيذها لهذا التأثير، لقد كانت «تنفِّذه» فحسب. استبدل أينشتاين منحنى الزمكان بالقوة، مما جعل «الفعل عن بُعد» غير ذي صلة، وكتب معادلات توضِّح كيفية تأثُّر المنحنى بتوزيع المادة، لكنه لم يشرح «السبب» في تصرُّف المنحنى بهذه الطريقة.

ظلَّ البشر على مدار آلاف الأعوام يَحسُبون بعض ظواهر الكون مثل الكسوف والخسوف قبل أن يدرك أحدٌ وجود الجاذبية. غير أننا حين أدركنا وجودها، صارت قدرتنا على حساب الكون أكثرَ فعالية. العنوان الفرعي للجزء الثالث من كتابه «الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية» والذي يصف قوانين الحركة والجاذبية كان «عن نظام العالم». لم تكن تلك سوى مبالغة طفيفة. فقوة الجاذبية والطريقة التي تستجيب بها الأجسام للقوى، تكمن في صميم معظم الحسابات الكونية. لذا فقبل أن نتناول أحدث الاكتشافات، مثل كيفية تلفُّظ الكواكب المحلقة للأقمار أو الكيفية التي بدأ بها الكون، يجدر بنا أولًا أن نوضح بعض الأفكار الأساسية عن الجاذبية.

قبل اختراع إنارة الشوارع، كان معظم البشر يعرفون القمر والنجوم معرفتهم للأنهار والأشجار والجبال. فبعد غروب الشمس، كانت النجوم تبزغ. وكان القمر يشعُّ بحرية، فيظهر أحيانًا في النهار ظلًّا شاحبًا، لكنه يضيء بسطوعٍ أكبر كثيرًا في الليل. بالرغم من ذلك، كانت توجد بعض الأنماط. فأي شخصٍ يراقب القمرَ لبضعة شهور، حتى وإن كانت مراقبة عابرة، كان سيلاحظ سريعًا أنه يتبع إيقاعًا محدَّدًا، ويتغيَّر شكله من هلال نحيف إلى قرص دائري، ثم يعيد الكرَّة كل ٢٨ يومًا. وهو يتحرَّك أيضًا على نحوٍ ملحوظٍ كل ليلة، فيتبع مسارًا مغلقًا متكررًا في السماء.

للنجوم أيضًا إيقاعها الذي تتبعه. فهي تدور مرةً في اليوم حول نقطة ثابتة في السماء، وكأنما هي مرسومة داخل وعاء دوَّار. يتحدَّث «سفر التكوين» عن قبَّة السماء، والكلمة العبرية التي تُترجَم إلى «قبَّة» تعني «وعاء».

بعد ملاحظة السماء لبضعة شهور، بدا من الواضح أيضًا أنَّ خمسةً من النجوم وبعضها من الأكثر لمعانًا، لا تدور مثل غالبية النجوم «الثابتة». فهي ليست مرتبطةً بالوعاء؛ بل تزحف ببطء عبره. ربط الإغريق بين هذه البقع الشاردة من الضوء وبين

هيرميس (رسول الآلهة) وأفروديت (إلهة الحب) وآريس (إله الحرب) وزيوس (ملك الآلهة) وكرونوس (إله الزراعة). وهذه الآلهة الرومانية المناظِرة لها هي ما منحها أسماءها الإنجليزية: «ميركوري» (عطارد) و«فينوس» (الزهرة) و«مارس» (المريخ) و«جوبيتَر» (المشتري) و«ساتورن» (زحل). أطلق الإغريق على هذه النجوم اسم planetes (الجوَّالة)، الذي اشتُق منه اسمها الحديث planets (الكواكب) التي نعرف منها الآن ثلاثة أخرى: الأرض وأورانوس ونبتون. كانت تتخذ مسارات غريبة، وبدا أنَّ بعضها لا يمكن التنبؤ به. تحرَّك بعضها أسرع نسبيًّا وبعضها أبطأ نسبيًّا. وكان بعضها يتحلَّق إيابًا حول نفسه مع مرور الشهور.

معظم الأفراد تقبَّلوا الأضواء مثلما هي عليه، على النحو نفسه الذي تقبَّلوا به وجود الأنهار والأشجار والجبال. غير أنَّ قِلة منهم طرحت الأسئلة. ما هذه الأضواء؟ لمَ توجد هناك؟ كيف تتحرَّك، ولماذا؟ لمَ تبدو الأنماط في بعض الحركات، ولا تبدو في البعض الآخر؟

قدَّم السومريون والبابليون بيانات رصدية أساسية. فقد كتبوا على الألواح الطينية بالنقوش المسمارية التي تشبه الإسفين. وكان من بين الألواح البابلية التي وجدها علماء الآثار، فهارس للنجوم تذكر مواقع النجوم في السماء، ويعود تاريخها إلى العام ١٢٠٠ قبل الميلاد تقريبًا، لكنها على الأرجح نسخٌ لألواح سومرية أقدمَ منها. كان الفلاسفة اليونانيون وعلماء الهندسة الذين ساروا على خطاهم أكثر وعيًا بالحاجة إلى المنطق والبرهان والنظرية. كانوا ينشدون الأنماط، حتى إنَّ الجماعة الفيثاغورثية اتخذت منحًى متطرفًا في ذلك النهج؛ إذ كانوا يعتقدون أنَّ الكون كله محكوم بالأعداد. واليوم يتفق معظم العلماء مع هذا الرأي وإن كانوا لا يتفقون في التفاصيل.

يُنسَب الفضل في التأثير الأكبر على التفكير الفلكي لدى الأجيال اللاحقة إلى عالم الهندسة اليوناني كلوديوس بطليموس الذي كان عالمًا في الفلك والجغرافيا. أتت باكورة أعماله تحت عنوان «المجسطي» وهي تسمية عربية لعنوانه الأصلي الذي كان في البداية «التصنيف الرياضي» ثم تحوَّل إلى «التصنيف العظيم»، ثم إلى «المجسطي» الأكبر. قدَّم كتاب «المجسطي» نظريةً مكتملة عن حركة الكواكب، تستند إلى ما كان اليونانيون يرون أنه أكثر الأشكال الهندسية مثالية: الدوائر والأفلاك.

لا تتحرَّك الكواكب في دوائر في حقيقة الأمر. ولم يكن ذلك ليصبح بالنبأ الجديد على البابليين لأنه لا يتفق مع جداولهم. ذهب اليونانيون إلى أبعد من ذلك متسائلين عمَّا سيتطابق معها. وجاءت إجابة بطليموس على النحو التالي: مجموعة من الدوائر تدعمها مجموعة من الأفلاك. ويتمركز الفلك الأكثر عمقًا «الناقل» على الأرض. ويقع محور الفلك

الثاني أو «فلك التدوير» مثبَّتًا داخل الفلك. ويكون كل زوج من الأفلاك منفصلًا عن البقية. لم تكن تلك بالفكرة الجديدة. فقبل ذلك بقرنين من الزمان، طوَّر أرسطو بعض الأفكار الأقدم واقترح نظامًا معقدًا يتألف من ٥٥ من الأفلاك المتحدة المركز، ويقع محور كل فلك بداخل الفلك الذي يقع بداخله. استخدم تعديل بطليموس عددًا أقلَّ من الأفلاك، وكان أكثرَ دقة، لكنه كان ما يزال معقدًا بعض الشيء. كلا النظامين أدَّى إلى التساؤل عمَّا إذا كانت الأفلاك موجودة بالفعل أم أنها كانت تخيُّلات ملائمة، أم أنَّ شيئًا مختلفًا تمامًا هو ما يحدث بالفعل.

على مدار الأعوام الألف التالية وأكثر، اتجهت أوروبا إلى قضايا لاهوتية وفلسفية، وأسَّست فهمها للعالم الطبيعي على ما قاله أرسطو قرابة عام ٣٥٠ قبل الميلاد. كان يُعتَقد بأنَّ الأرض هي مركز الكون، وبأنَّ كل شيء يدور حول الأرض الساكنة. انتقلت شعلة الابتكار في علم الفلك والرياضيات إلى أرض العرب والهند والصين. غير أنها انتقلت إلى أوروبا من جديد مع فجر النهضة الإيطالية. ونتيجةً لذلك، أدَّى ثلاثة من عمالقة العلم أدورًا رئيسة في تقدُّم المعرفة الفلكية: جاليليو وكيبلر ونيوتن. وكان الفريق المساعد ضخمًا للغاية.

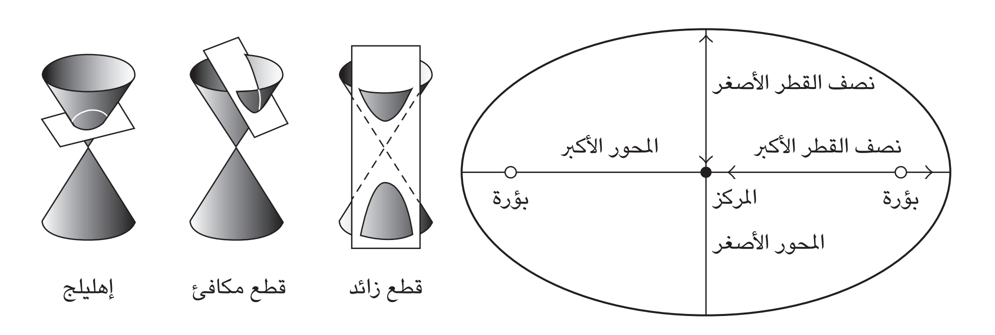
يشتهر جاليليو بابتكار تحسينات على التلسكوب، وهو ما مكَّنه من اكتشاف وجود بقعٍ على الشمس، ووجود أربعة أقمار (على الأقل) تدور بكوكب المشتري، ومرور كوكب الزهرة بأطوار كأطوار القمر، ووجود أمرٍ غريب بشأن زحل، وهو ما فُسِّر لاحقًا بأنه نظامه الحلقي. قاده هذا الدليل إلى رفض نظرية مركزية الأرض، والاقتناع بالنظرية المنافسة التي وضعها نيكولاس كوبرنيكوس بشأن مركزية الشمس، والتي تقول بدوران الكواكب والأرض حول الشمس، مما أوقع جاليليو في المتاعب مع كنيسة روما. غير أنه توصَّل أيضًا إلى اكتشافٍ يبدو أكثر تواضعًا، لكنه أهمُّ في نهاية المطاف، وهو وجود نمط رياضي في حركة الأجسام مثل قذيفة المدافع. فهنا في الأسفل، نجد أنَّ الجسم المتحرك بحرية يتسارع (عند السقوط) أو يتباطأ (عند الارتفاع) بمقدار ثابت على مدار فترة زمنية ثابتة «صغيرة». ومعنى هذا باختصار أنَّ تسارُع الجسم ثابت. لمَّا كان جاليليو يفتقر إلى وجود ساعات دقيقة، فقد لاحظ هذه التأثيرات عن طريق دحرجة الكرات على منحدرات لطيفة.

أما الشخصية الرئيسة التالية فهو كيبلر. كان رئيسه في العمل تيخو براهي قد أجرى قياسات دقيقة للغاية لمواقع المريخ. وحين تُوفِّي براهي، وَرِث كيبلر منصبه بصفته فلكيًّا

لدى الإمبراطور الروماني المقدَّس ردولف الثاني، وورِث أيضًا ملاحظاته، ثم بدأ في حساب الشكل الفعلي لمدار المريخ. وبعد ٥٠ محاولة فاشلة، استنتج أنَّ المدار على شكل القطع الناقص؛ أي يتخذ شكلًا بيضاويًّا كدائرة منبعجة. واكتشف أنَّ الشمس تقع عند نقطة مميزة هي بؤرة القطع الناقص.

كان علماء الهندسة من اليونانيين القدماء يعرفون القطوع الناقصة، وقد عرَّفوها بأنها مقاطع مستوية من مخروط، وهذه «المقاطع المخروطية» تتضمن الدوائر والقطوع الناقصة والقطوع المكافئة والقطوع الزائدة.

حين يتحرَّك كوكب في مدارٍ على شكل القطع الناقص، تختلف المسافة بينه وبين الشمس. تزيد سرعته حين يقترب من الشمس، وتقل حين يكون أكثر بعدًا. ومن المدهش بعض الشيء أنَّ هذه التأثيرات تتعاون لتخلق مدارًا يتخذ الشكل نفسه عند الطرفين. لم يتوقَّع كيبلر هذا، وظل مقتنعًا لفترة طويلة بأنَّ القطع الناقص إجابة خاطئة بالتأكيد. نصف القطر الأصغر.



على اليسار: المقاطع المخروطية. على اليمين: الخصائص الأساسية للقطع الناقص.

يتحدَّد حجم القطع الناقص وشكله وفقًا لطولين: محوره الأكبر، وهو أطول خط بين نقطتين على القطع الناقص، ومحوره الأصغر الذي يكون عموديًّا على المحور الأكبر. وتُعد الدائرة نوعًا مميزًا من القطع الناقص إذ تتساوى فيها هاتان المسافتان، وتشكِّلان قطر الدائرة. بالنسبة للأغراض الفلكية، يُعد نصف القطر قياسًا متوقَّعًا بدرجة أكبر؛ فنصف القطر لمدار دائري هو المسافة التي يبعدها الكوكب عن الشمس، ويناظره في القطع الناقص كميتان تُسميان بنصف القطر الأكبر ونصف القطر الأصغر. وفي كثير من الأحيان، يُشار

إلى هاتين الكميتين بالمصطلحين الغريبين: نصف المحور الأكبر ونصف المحور الأصغر؛ لأنهما يقطعان المحورين في المنتصف. ثمَّة خاصية أقل وضوحًا في القطع الناقص لكنها مهمة للغاية، وهي اللامركزية التي تحدِّد طوله وضيقه. تبلغ قيمة اللامركزية صفرًا في الدائرة، وتصبح كبيرةً بدرجة لا نهائية في نصف القطر الأكبر الثابت، بينما تقترب قيمتها في نصف القطر الأصغر من الصفر.[2]

يمكن تحديد شكل المدار الإهليلجي وحجمه من خلال عددين. وعادةً ما يقع الاختيار على قيمة نصف القطر الأكبر واللامركزية. ويمكن التوصُّل إلى نصف القطر الأصغر منهما. يبلغ نصف القطر الأكبر للأرض ١٤٩٫٦ مليون كيلومتر، وتبلغ لا مركزيتها ٠٫٠١٦٧. ويبلغ نصف القطر الأصغر ١٤٩٫٥٨ مليون كيلومتر؛ ومن ثمَّ فإنَّ المدار يقترب كثيرًا من شكل الدائرة، مثلما يتضح من القيمة الصغيرة للامركزية. يتخذ مستوى مدار الأرض اسمًا مميزًا: مدار الشمس.

يمكن تحديد الموقع المكاني لأي مدار إهليلجي آخر حول الشمس عن طريق ثلاثة أعداد أخرى، وكلها زوايا. يمثِّل أول هذه الأعداد الميلان بين المستوى المداري وبين مدار الشمس. ويقدِّم ثانيها اتجاه المحور الأكبر في ذلك المستوى. ويقدِّم ثالثها اتجاه الخط الذي يلتقي عليه المستويان. وأخيرًا نحتاج إلى معرفة موقع الكوكب في المدار؛ مما يستدعي معرفة زاوية أخرى. إذن فتحديد مدار الكوكب وموقعه في ذلك المدار يستلزم معرفة عددَين وأربع زوايا: ستة عناصر مدارية. وقد تمثَّل أحد الأهداف الأساسيَّة لعلم الفلك المبكِّر في حساب العناصر المدارية لكل كوكبٍ وكُوَيكبٍ مكتشَف. فبعد معرفة هذه الأعداد، يمكن التنبؤ بحركة الجسم في المستقبل إلى أن تؤديَ التأثيرات المجتمعة لأجسامٍ أخرى إلى اضطراب مداره اضطرابًا ملحوظًا على أقل تقدير.

توصَّل كيبلر في نهاية المطاف إلى مجموعةٍ تتكوَّن من ثلاثة أنماط رياضيَّة أنيقة، تُسمَّى الآن بقوانين كيبلر لحركة الكواكب. ينصُّ القانون الأول على أنَّ الكوكب يدور حول الشمس في قطعٍ ناقصٍ تحتلُّ الشمس إحدى بؤرتَيه. وينص القانون الثاني على أنَّ الخط الواصل بين الشمس والكوكب يقطع مساحات متساوية في فترات زمنية متساوية. ويذكر القانون الثالث أنَّ مربع الفترة المدارية للكوكب يتناسب مع مكعب المسافة.

أعاد نيوتن صياغة ملاحظات جاليليو بشأن الأجسام الحرة الحركة في صورة قوانين الحركة الثلاثة. ينصُّ القانون الأول على أنَّ الأجسامَ تستمرُّ في الحركة في خطٍّ مستقيمٍ

وبسرعةٍ ثابتةٍ ما لم تؤثِّر عليها قوة. وينص القانون الثاني على أنَّ حاصل ضرب تسارع الجسم في كتلته يساوي القوة المؤثرة عليه. وينص القانون الثالث على أنَّ أيَّ فعلٍ ينتج ردَّ فعلٍ مساوٍ له في القوة ومضاد له في الاتجاه. وفي عام ١٦٨٧، أعاد صياغة قوانين كيبلر الكوكبية في صورة قاعدةٍ عامةٍ تصفُ حركة الأجسام السماويَّة — قانون الجاذبيَّة — وهو صيغة رياضيَّة لقوة الجاذبية التي يجذب بها أيُّ جسم جسمًا آخر.

الحق أنه «استنتج» قانون القوة الذي وضعه من قوانين كيبلر من خلال افتراضٍ واحدٍ فقط، وهو أنَّ الشمس تبذل قوة جاذبة تتجه دائمًا نحو مركزها. وبناءً على هذا الافتراض، أثبت نيوتن أنَّ القوة تتناسب عكسيًّا مع مربَّع المسافة. تلك هي الطريقة الراقية لقولنا إنَّ ضرب كتلة أيٍّ من الجسمَين في ثلاثةٍ على سبيل المثال، يضاعف القوة بمقدار ثلاثة أضعاف أيضًا، أما ضربُ المسافة بينهما في ثلاثة، فيقلِّل القوة إلى تُسع المقدار. أثبت نيوتن العكس أيضًا، وينطوي «قانون التربيع العكسي» للجاذبية هذا على قوانين كيبلر الثلاثة.

يُنسب الفضل في وضع قانون الجاذبية إلى نيوتن عن استحقاق، لكنه لم يبدع الفكرة نفسها. فقد استنتج كيبلر شيئًا مشابهًا قياسًا على الضوء، لكنه حسب أنَّ الجاذبية تدفع الكواكب في مداراتها. لم يوافق إسماعيل بوليالدوس على هذا، وكانت حجَّته أنَّ قوة الجاذبية لا بد أن تتناسب تناسبًا عكسيًّا مع مربَّع المسافة. وفي محاضرةٍ ألقاها روبرت هوك في الجمعية الملكية عام ١٦٦٦، قال إنَّ جميع الأجسام تتحرَّك في خطٍّ مستقيمٍ ما لم تؤثِّر عليها قوة، وكل الأجسام يؤثِّر بعضها على بعضٍ بقوة الجاذبية، وإنَّ قوة الجاذبية تقلُّ مع المسافة وفقًا لصيغةٍ قال عنها: «أعترف بأنني لم أكتشفها.» وفي عام ١٦٧٩، استقرَّ على قانون تربيع عكسي للجاذبية وكتب إلى نيوتن بشأنه.[3] ولهذا انزعج هوك أشد الانزعاج حين ظهر القانون نفسه في كتاب «الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية» رغم أنَّ نيوتن نسب له الفضل مع هالي وكريستوفر رِن.

تقبَّل هوك أنَّ نيوتن وحده هو مَن استنتج أنَّ المدارات المغلقة تتخذ شكل القطع الناقص. وكان نيوتن يعرف أنَّ قانون التربيع العكسي يسمح أيضًا بوجود مدارات تتخذ شكل القطع المكافئ والقطع الزائد، لكن هذه المدارات ليست منحنيات مغلقة؛ ولهذا لا تتكرَّر الحركة بصفة دورية. ثمَّة تطبيقات فلكية لهذين النوعين من المدارات أيضًا، وهي تُستخدم في المذنَّبات بصفة أساسية.

يتفوق قانون نيوتن على قانون كيبلر بسبب خاصية إضافية، وهي تنبؤ أكثر منها نظرية. لقد أدرك نيوتن أنه لَمَّا كانت الأرض تجذب القمر، فمن المنطقي أن يؤثِّر القمر

أيضًا بقوة جذب على الأرض. فهما أشبه براقصين ريفيين يمسكان الأيدي ويدوران ثم يدوران. يشعر كل راقص بالقوة التي يبذلها عليه الآخر وكلٌّ منهما يشد ذراع الآخر. يبقى كل راقص في مكانه بفعل هذه القوة: إذا تخلَّيا عنها، فسوف يدوران بعيدًا على أرضية الرقص. بالرغم من ذلك، فالأرض أضخم كثيرًا من القمر؛ لذا فالأمر أشبه برجلٍ سمين يرقص مع طفل صغير. ويبدو أنَّ هذا الرجل يظل في مكانه بينما يدور الطفل الصغير حوله. غير أنك إذا دقَّقت النظر، فسوف ترى أنَّ الرجل يدور أيضًا: تلتف قدماه في دوائر صغيرة، والمركز الذي يدور حوله أقرب قليلًا إلى الطفل مما كان سيغدو عليه إذا كان الطفل يدور بمفرده.

وقد أدَّى هذا التسويغ بنيوتن إلى الاعتقاد بأنَّ «كل» جسم في الكون يجذب كل جسم آخر. لا ينطبق قانون كيبلر إلا على نوعين من الأجسام هما الشمس والكوكب. أما قانون نيوتن فهو ينطبق على أي نظام من الأجسام أيًّا كان؛ لأنه يقدِّم كلًّا من المقدار والاتجاه لـ «جميع القوى التي تحدث.» لمَّا كانت هذه التوليفات من القوى مدرجةً في قوانين الحركة، فإنها تحدِّد تسارع كل جسم في أي لحظة؛ ومن ثمَّ سرعته المتجهة؛ ومن ثمَّ موقعه. لقد كان الإعلان عن قانونٍ كونيٍّ للجاذبية لحظةً ملحمية في التاريخ وفي تطوُّر العلوم؛ إذ كان كشفًا للآلية الرياضية الخفية التي تحافظ على استمرار الكون.

بدأت قوانين نيوتن للحركة والجاذبية تحالفًا مستمرًّا بين علم الفلك والرياضيات؛ فأدَّت إلى الكثير مما نعرفه اليوم بشأن الكون. بالرغم من ذلك، فحتى عندما نفهم القوانين، لا يكون تطبيقها على المشكلات المحددة أمرًا مباشرًا. فقوة الجاذبية على وجه التحديد «غير خطية»، وهو مصطلح تقني تتمثَّل نتيجته الأساسية في أننا لا نستطيع حل معادلات الحركة باستخدام صيغ لطيفة. ولا نستطيع حلها حتى بصيغ بغيضة.

بعد نيوتن، تغلَّب الرياضيون على هذه المعضلة إما بالتعامل مع مسائل اصطناعية (لكنها مثيرة للاهتمام)، مثل الكتل الثلاث المرتَّبة في مثلثٍ متساوي الأضلاع، وإما باشتقاق حلول تقريبية لمشكلاتٍ أكثر واقعية. صحيح أنَّ النهج الثاني عملي بدرجة أكبر، لكنَّ الكثير من الأفكار المفيدة قد أتى من النهج الأول في حقيقة الأمر بالرغم من طبيعته الاصطناعية.

لقد قضى ورثة نيوتن في العلم زمنًا طويلًا كان عليهم فيه أن يُجروا الحساباتِ بأيديهم، وتلك مهمة بطولية في معظم الأحيان. ومن الأمثلة على ذلك تشارلز أوجين ديلوناي الذي بدأ عام ١٨٤٦ في حساب صيغة تقريبية لحركة القمر. استغرقت المهمة ٢٠ عامًا،

ونشر نتائجه في كتابين. جاء هذان الكتابان فيما يزيد على ٩٠٠ صفحة، وكان الكتاب الثاني بأكمله يتألَّف من الصيغة. وفي نهاية القرن العشرين، جرى التحقُّق من إجابته باستخدام الجبر الحاسوبي (وهي أنظمةٌ برمجية يمكنها معالجة الصيغ لا الأعداد فحسب). لم يوجد سوى خطأين صغيرين كان أحدهما نتيجةً للآخر. ولم يكن لكلا الخطأين سوى تأثيرٍ طفيفٍ للغاية.

تنتمي قوانين الحركة والجاذبية إلى نوعٍ خاص من المعادلات، يُعرف بالمعادلات التفاضلية. تحدِّد هذه المعادلات المعدَّل الذي تتغير به الكميات مع مرور الوقت. فالسرعة المتجهة هي معدَّل التغير في الموقع، والتسارع هو معدَّل التغير في السرعة المتجهة. فالمعدل الذي تتغيَّر به كميةٌ ما في الوقت الحالي، يتيح لنا التنبؤ بقيمتها في المستقبل. إذا كانت إحدى السيارات تتحرك ١٠ أمتار في الثانية، فبعد ثانية من الآن، ستكون قد تحرَّكت ١٠ أمتار. غير أنَّ هذا النوع من الحسابات يتطلب أن يكون معدل التغير ثابتًا. وإذا كانت السيارة تتسارع، فبعد ثانية من الآن، ستكون قد تحرَّكت أكثر من ١٠ أمتار. تتغلب المعادلات التفاضلية على هذه المشكلة من خلال تحديد المعدل اللحظي للتغير. والواقع أنَّها تتعامل مع فترات زمنية قصيرة للغاية حتى يمكن اعتبار معدل التغير ثابتًا خلال تلك الفترة الزمنية. وقد استغرق الأمر مئات الأعوام كي يتمكَّن الرياضيون من تسويغ تلك الفكرة بدقة منطقية كاملة؛ إذ لا يمكن أن توجد فترة زمنية نهائية لحظية إلا أن تكون صفرًا، ولا شيء يتغير في صفر من الوقت.

خلقت أجهزة الكمبيوتر ثورة منهجية. فبدلًا من حساب صيغ تقريبية للحركة، ثم وضع الأعداد في الصيغ، يمكنك وضع الأعداد من البداية. فلنفترض أنك ترغب في التنبؤ بالموقع الذي سيوجد فيه نظام من الأجسام، وليكن أقمار المشتري على سبيل المثال، بعد ١٠٠ عام. ستبدأ بالمواقع الابتدائية والحركات للمشتري وأقماره، وأي جسم آخر قد يكون مهمًّا مثل الشمس وزحل. بعد ذلك، ستتقدَّم خطوة ضئيلة في الزمن بخطوة ضئيلة في الزمن، وتحسب مدى تغيُّر الأعداد التي تصف «جميع» الأجسام. ستكرِّر تلك الخطوات إلى أن تصل إلى ١٠٠ عام، ثم تتوقَّف. ولا يمكن لإنسان لا يستخدم سوى ورقة وقلم رصاص أن يطبِّق هذه الطريقة على أي مشكلة واقعية. ذلك أنها ستستغرق أعمارًا عديدة. أما باستخدام جهاز كمبيوتر سريع، فتصبح الطريقة ملائمة تمامًا. ولا شك في أنَّ أجهزة الكمبيوتر الحديثة سريعة للغاية بالفعل.

الحق أنَّ الأمر «ليس» بتلك السهولة. فبالرغم من أنَّ الخطأ الذي يحدث في كل خطوة (بسبب افتراض معدل تغيُّر ثابت، بينما هو يختلف قليلًا في الواقع) صغير للغاية، يتعيَّن

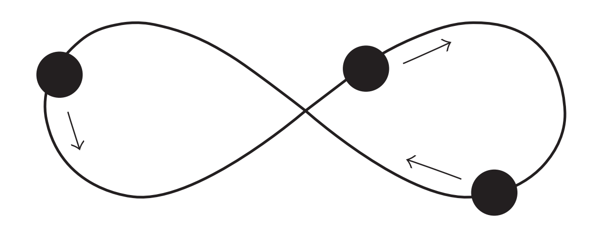
عليك استخدام عدد مهول من الخطوات. وليس من الأكيد أن ينتج لنا العدد الكبير المضروب في خطأ صغير، نتيجة صغيرة، لكنَّ الطرق المعدة بعناية تَحُد من الأخطاء. ثمَّة فرع من الرياضيات يعالج هذه المسألة بالتحديد، وهو فرع التحليل العددي. من الملائم أن نشير إلى هذه الطرق باسم «المحاكاة»؛ مما يعكس الدور الأساسي لجهاز الكمبيوتر. من المهم أن نفهم أننا لا نستطيع حل مسألة من خلال «إدخال الأعداد إلى الكمبيوتر» فحسب. فلا بد أن يقوم شخصٌ ما ببرمجة الآلة بالقواعد الرياضية التي تجعل حساباتها مطابقة للواقع.

بالغة هي دقةُ تلك القواعد حتى إنَّ علماء الفلك يستطيعون التنبؤ بحدوث كسوف الشمس وخسوف القمر في الموعد المحدَّد بالثانية، ويتنبئون بموقع حدوثهما على الكوكب في نطاق بضعة كيلومترات، ولمئات الأعوام في المستقبل. يمكن أيضًا إجراء هذه «التنبؤات» عكسيًّا، لتحديد المكان والزمان الدقيقين اللذين شهدا ظواهر الكسوف والخسوف التي سجَّلها التاريخ. وقد استُخدِمت هذه البيانات في تأريخ الملاحظات التي رصدها على سبيل المثال، علماء الفلك الصينيون قبل آلاف الأعوام.

لا يزال الرياضيون والفيزيائيون حتى اليوم يكتشفون نتائجَ جديدة وغير متوقعة لقانون نيوتن للجاذبية. ففي عام ١٩٩٣، استخدم كريس مور الطرق العددية لإثبات أنَّه يمكن لثلاثة أجسام متطابقة في الكتلة أن يلاحق بعضها بعضًا بصورة متكررة على مدارٍ يتخذ الشكل 8، وفي عام ٢٠٠٠، أثبت كارلس سيمو بالطرق العددية أنَّ هذا المدار يكون مستقرًّا، إلا من انجراف بطيء قد يحدث. وفي عام ٢٠٠١، قدَّم ألان تشينسينر وريتشارد مونتجمري برهانًا دقيقًا يثبت وجود هذا المدار، استنادًا إلى مبدأ الفعل الأدنى، وهو مبرهنة جوهرية في الميكانيكا الكلاسيكية.[4] لقد اكتشف سيمو العديد من «تصاميم الرقص» المتشابهة، التي توجد فيها عدةُ أجسام متطابقة الكتلة يلاحق بعضها بعضًا على المدار «المعقَّد» نفسه.[5]

يبدو أنَّ استقرار مدار ثلاثة الأجسام الذي يتخذ الشكل 8، يستمر في حالة وجود اختلاف طفيف بين الكتل؛ مما يطرح احتمالية صغيرة بوجود ثلاثة نجوم حقيقية تتصرف على هذا النحو المميز. يقدِّر دوجلاس هيجي أنَّه ثمَّة احتمال صغير بوجود نظام ثلاثي واحد من هذا النوع في كل مجرة، وأنه ثمَّة احتمال كبير بوجود واحد منها على الأقل في مكانٍ ما في الكون.

توجد كل هذه المدارات في سطحٍ مستوٍ، لكنَّ ثمَّة احتمالية جديدة قد ظهرت بوجودها في سطح ثلاثي الأبعاد. ففي عام ٢٠١٥، أدرك يوجين أوكس أنَّ ثمَّة مداراتٍ غير معتادةٍ



مدار ثلاثة الأجسام الذي يتخذ الشكل 8.

للإلكترونات في «شبه جزيئات ريدبرج» قد تحدث أيضًا في جاذبية نيوتن. فقد أوضح أنَّ الكوكب يمكن أن يُدفع إلى الأمام والخلف بين نجمَيْ نظام ثنائي في مدار لولبي يلتفُّ حول الخط الذي يضمهما.[6] يتسع اللولب في المنتصف لكنه يضيق بالقرب من النجمين. تخيَّل ضم النجمين عن طريق شريط مطاطي دوَّار يتمدَّد في المنتصف، ويتضاعف على نفسه عند الطرفين. في حالة النجوم المختلفة الكتلة، سيقل حجم الشريط المطاطي تدريجيًّا ليتخذ شكل المخروط. يمكن للمدارات من هذا النوع أن تكون مستقرة، حتى وإن لم تكن النجوم تتحرك في دوائر.

إنَّ غيوم الغاز المنهارة تشكِّل مدارات مستوية؛ لذا فمن غير المرجَّح أن يتكوَّن كوكب في مثل ذلك المدار. غير أنَّ كوكبًا أو كويكبًا مضطربًا في مدار شديد الانحراف، قد يؤسر في أحيان نادرة في نظام ثنائي النجوم وينتهي به الأمر في الدوران اللولبي بين النجمين. ثمَّة دليل مبدئي يشير إلى أنَّ «كيبلر ١٦ بي»، وهو كوكب يدور حول نجم بعيد، قد يكون أحدها.

ثمَّة جانب في قانون نيوتن كان يزعج الرجل العظيم نفسه؛ بل إنه كان يزعجه أكثرَ مما أزعج معظم مَن أكملوا على عمله. ذلك أنَّ القانون يصف القوة التي يبذلها أحد الجسمين على الآخر، لكنه لا يصف «آلية عمل» هذه القوة. يفترض القانون حالة غامضة من «الفعل عن بُعد». فعندما تجذب الشمس الأرضَ، لا بد للأرض أن «تعرف» بطريقةٍ ما، مقدار المسافة التي تبعدها عن الشمس. وإذا جَمع بين الاثنين وتر مطاطي ما على سبيل المثال، فيمكن للوتر أن يبث القوة، وستحكم فيزياء الوتر مدى شدة القوة. غير أنَّ الشمس والأرض لا يوجد بينهما سوى فضاء فارغ. فكيف تعرف الشمس مقدار ما يجب أن تبذله من قوة لجذب الأرض، أو تعرف الأرض الشدة التي يجب أن تُجذَب بها؟[7]

من الناحية العملية، يمكننا تطبيق قانون الجاذبية دون القلق بشأن الآلية التي تنقل القوة من جسم إلى آخر. وذلك ما فعله الجميع في المجمل. غير أنَّ قلةً من الفيزيائيين يتمتعون بمسحة فلسفية، وسنجد في ألبرت أينشتاين مثالًا مدهشًا على هذا. لقد غيرت نظرية النسبية الخاصة التي وضعها ونُشِرت عام ١٩٠٥ رؤية الفيزيائيين للمكان والزمان والمادة. وجاءت نظرية النسبية العامة عام ١٩١٥ امتدادًا لها لتغير رؤيتهم للجاذبية، وكمسألة جانبية، حلت السؤال الشائك بشأن الكيفية التي يمكن بها لقوة أن تعمل عن بُعد. وقد فعلت ذلك بالتخلص من القوة نفسها.

لقد استنتج أينشتاين النسبية الخاصة من مبدأ جوهري واحد، وهو أنَّ سرعة الضوء تبقى ثابتة لا تتغير حتى حين يتحرك الملاحظ بسرعة ثابتة. وفقًا للميكانيكا النيوتونية، إذا كنت في سيارة مفتوحة السقف، وقذفت بكرة في اتجاه حركة السيارة، فإنَّ سرعة الكرة حين يقيسها ملاحظ ساكن على جانب الطريق، ستساوي سرعة الكرة بالنسبة إلى السيارة، «زائد» سرعة السيارة. وينطبق الأمر نفسه إذا أضأت شعاع كشاف أمام السيارة، فإنَّ سرعة الضوء حين يقيسها شخص على جانب الطريق يجب أن تكون سرعته المعتادة زائد سرعة السيارة.

أدَّت البيانات التجريبية وبعض التجارب الفكرية إلى إقناع أينشتاين بأنَّ الضوء «ليس» كذلك. فسرعة الضوء الملاحَظَة هي «نفسها» للشخص الذي يضيء المصباح، والشخص الموجود على جانب الطريق. والنتائج المنطقية لهذا المبدأ — والتي كنت أشعر على الدوام بأنها يجب أن تُسمى «اللانسبية» — مدهشةٌ للغاية. لا يمكن لأي شيء أن يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء.[8] حين يقترب جسمٌ ما من سرعة الضوء، فإنه يتضاءل في اتجاه الحركة، وتزداد كتلته، ويمر الوقت ببطء شديد للغاية. إذا بلغ الجسم سرعة الضوء، إن كان ذلك ممكنًا على الإطلاق، فإنه سيصبح نحيفًا على نحوٍ لا نهائي، وتصبح كتلته لا نهائية، وسيتوقف الزمن عليه. ترتبط الكتلة بالطاقة: فالطاقة تساوي الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء. وأخيرًا، يمكن للأحداث التي يعتقد أحد الملاحظين أنها متزامنة، ألا تكون آنية لملاحظ آخر يتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة إلى الملاحظ الأول.

في الميكانيكا النيوتونية، لا شيء من هذه الأمور الغريبة يحدث. فالمكان مكان والزمان زمان، ولا يلتقي الاثنان أبدًا. في النسبية الخاصة، يمكن التبديل بين المكان والزمان إلى حدٍّ ما، وهذا الحد محكوم بسرعة الضوء. فهما يشكِّلان معًا امتداد الزمكان. وبالرغم من تنبؤاتها الغريبة، صارت النسبية الخاصة مقبولة بصفتها أكثر النظريات التي نمتلكها دقةً

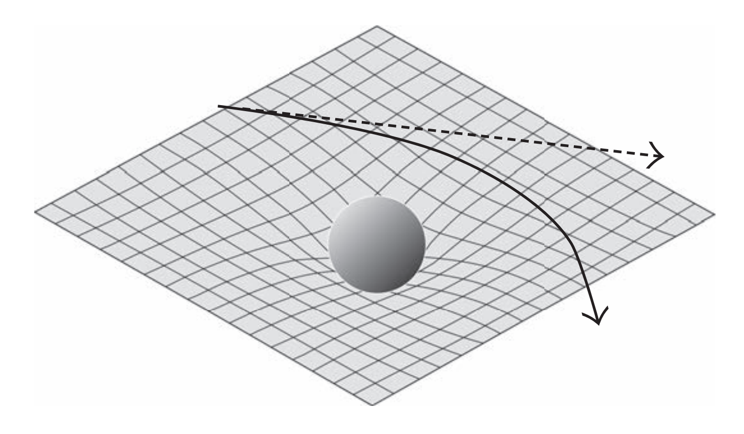
في وصف الزمان والمكان. ومعظم نتائجها الأكثر غرابة لا تظهر إلا حين تتحرك الأجسام بسرعة كبيرة للغاية؛ ولهذا لا نلاحظها في حياتنا اليومية.

المكوِّن الناقص الأكثر وضوحًا هو الجاذبية. قضى أينشتاين أعوامًا في محاولة دمج قوة الجاذبية في نظرية النسبية، مدفوعًا في ذلك جزئيًّا بوجود انحراف في مدار عطارد.[9] وكانت النتيجة النهائية هي النسبية العامة، التي تحوِّل صياغة النسبية الخاصة من امتداد زمكان «مسطح» إلى امتداد زمكان «منحنٍ». يمكننا أن نفهم على نحوٍ تقريبي ما ينطوي عليه اختصار المكان إلى بُعدين بدلًا من ثلاثة. في هذه الحالة، يصبح المكان مستويًا، وتصف النسبية الخاصة حركة الجسيمات في هذا المستوى. وفي غياب الجاذبية، تسير الجزيئات في خطوط مستقيمة. والخط المستقيم مثلما أشار إقليدس هو أقصر مسافة بين نقطتين. لإحضار الجاذبية إلى الصورة، ضع نجمًا في المستوى. وحينها، لا تعود الجسيمات تسير في خطوط مستقيمة؛ بل تدور حول النجم في منحنيات، كأشكال القطع الناقص.

وفقًا لفيزياء نيوتن، تنحني هذه المسارات لوجود قوة تُحوِّل الجسيم عن مساره في خط مستقيم. وفي النسبية العامة، يحدث تأثير مشابه بسبب انحناء الزمكان. لنفترض أنَّ النجم يشوِّه المستوى ويشكِّل واديًا دائريًّا — «بئر جاذبية» يكون النجم في قاعه — ولنفترض أنَّ الجسيمات المتحركة تتبع المسار الأقصر أيًّا كان. ثمَّة مصطلح تقني لهذا المسار الأقصر، وهو «الخط الجيوديسي». ولأنَّ امتداد الزمكان منحنٍ، لا تعود الخطوط الجيوديسية خطوطًا مستقيمة. فعلى سبيل المثال، يمكن أن يُحبس أحد الجسيمات في وادٍ، ويستمر في الدوران على ارتفاع محدَّد، مثل كوكب يدور في مدار مغلق.

وبدلًا من القوة الافتراضية التي تتسبَّب في انحناء مسار الجسيم، عوَّض عنها أينشتاين بزمكان منحنٍ «بالفعل»، يؤثِّر انحناؤه في مسار جسيم متحرك. لا حاجة لوجود «الفعل عن بُعد»؛ فالزمكان منحنٍ لأنَّ هذا هو ما تفعله به النجوم، وتستجيب الأجسام المدارية للانحناء القريب. إنَّ ما نشير إليه نحن ونيوتن بالجاذبية، ونتخيله على صورة قوة، هو في حقيقة الأمر انحناء للزمكان.

كتب أينشتاين صيغًا رياضية تُعرف باسم معادلات أينشتاين للمجال،[10] وهي تصف تأثير الانحناء في حركة الكتل، وتأثير توزيع الكتل في الانحناء. في حالة عدم وجود أي كتل، تُختصَر الصيغة إلى النسبية الخاصة. إذن، فجميع الآثار الغريبة، مثل تباطؤ الوقت، تحدث أيضًا في النسبية العامة. لا شك في أنَّ الجاذبية يمكن أن «تتسبَّب» في تباطؤ الوقت، حتى وإن كان الجسم لا يتحرَّك. عادةً ما تكون هذه الآثار المحيِّرة صغيرة، لكن في الظروف



تأثير الانحناء/الجاذبية على جزيء يمر بنجم أو كوكب.

المتطرفة، يختلف السلوك الذي تتنبأ به النسبية (من أي النوعين) اختلافًا كبيرًا عن السلوك الذي تتنبأ به الفيزياء النيوتونية.

أتظن أنَّ هذا كله ضرب من الجنون؟ لقد ظنَّ الكثيرون ذلك في البداية. غير أنَّ جميع مَن يستخدمون الملاحة بالأقمار الصناعية في سياراتهم يعتمدون على النسبية الخاصة والعامة كلتيهما. فالعمليات الحسابية التي تخبرك بأنك على مشارف بريستول وتتوجَّه جنوبًا على الطريق السريع إم ٣٢، تعتمد على إشارات التوقيت من الأقمار الاصطناعية المدارية. والرقاقة الموجودة في سيارتك، والتي تحسب موقعك، يجب أن تصحِّح تلك التوقيتات وفقًا لعاملين: السرعة التي يتحرك بها القمر الصناعي، وموقعه في بئر جاذبية الأرض. يستلزم الأول النسبية الخاصة، ويستلزم الثاني النسبية العامة. وبدون هذه التصحيحات، سيضعك نظام الملاحة في غضون بضعة أيام في قلب المحيط الأطلنطي.

توضِّح النسبية العامة أنَّ فيزياء نيوتن «ليست» هي «نظام العالم» الصحيح الدقيق، الذي كان نيوتن وجميع العلماء الآخرين تقريبًا قبل القرن العشرين يعتقدون بوجوده. غير أنَّ ذلك الاكتشاف لم يسدل ستار النهاية على فيزياء نيوتن. الواقع أنها تُستخدم الآن على نطاقٍ أكبر كثيرًا. ذلك أنَّ الفيزياء النيوتونية أبسط كثيرًا من النسبية، وهي «جيدة بالدرجة الكافية للأعمال الحكومية»، مثلما يُقال حرفيًّا. فالاختلافات بين النظريتين لا تظهر غالبًا إلا عند معالجة الظواهر الغريبة، مثل الثقوب السوداء. ولهذا، لا يزال علماء

الفلك ومهندسو البعثات الفضائية الذين يعملون غالبًا لصالح الحكومات أو وفقًا لعقود بين الحكومات والمنظمات مثل ناسا وإيسا؛ يستخدمون الميكانيكا النيوتونية في الغالبية العظمى من الحسابات. ثمَّة استثناءات قليلة هي التي يكون التوقيت فيها حساسًا للغاية. ومع تكشُّف جوانب القصة، سنرى تأثير قانون نيوتن للجاذبية مرارًا وتَكرارًا. إنه على تلك الدرجة من الأهمية بالفعل؛ فهو أحد أعظم الاكتشافات العلمية على الإطلاق.

بالرغم من ذلك، في علم الكونيات، وهو دراسة الكون بأكمله لا سيما نشأته، علينا أن ننحِّي فيزياء نيوتن جانبًا. فهي لا تقدِّم تفسيرًا للملاحظات الأساسية. وبدلًا منها، علينا أن نستدعي النسبية العامة، ويساعدها على ذلك باقتدار ميكانيكا الكم. وحتى هاتان النظريتان العظيمتان في حاجةٍ إلى مساعدة إضافية على ما يبدو.

الفصل الثاني

انهيار السديم الشمسي

«قبل ما يقرب من ألفَيْ مليون عام، كان ثمَّة مجرتان تتصادمان؛ بل تجتاز إحداهما الأخرى على الأحرى ... وفي الوقت نفسه تقريبًا، في نطاق هامش خطأ تبلغ قيمته ١٠٪ خاضعة للزيادة أو النقصان، صارت الغالبية العظمى من الشموس الموجودة في هاتين المجرتين، مسكونةً بالكواكب.»

د. إدوارد إي سميث، «ثلاثي الكواكب»

«ثلاثي الكواكب» هي الرواية الأولى في سلسلة روايات الخيال العلمي الشهيرة للكاتب إدوارد إي سميث، «لينزمان»، وتعبِّر فقرتها الافتتاحية عن نظرية بشأن نشأة الأنظمة الكوكبية، كانت رائجة عند ظهور الكتاب عام ١٩٤٨. تظل هذه الفقرة حتى اليوم طريقة مؤثِّرة لافتتاح رواية خيال علمي، وقد كانت أخَّاذة للغاية في وقتها. تُعد هذه الروايات من الأمثلة المبكِّرة على أسلوب «وايدسكرين باروك» أو أوبرا الفضاء، وهي معركة كونية بين قوى الخير (ممثَّلة في أريزيا) وقوى الشر (إيدور)، وتأتي في ستة كتب. صحيح أنَّ الشخصيات متخشبة والحبكة مبتذلة، لكنَّ تسلسل الأحداث آسر، وقد كان الإطار وقتها منقطع النظير.

لم نَعُد نعتقد اليوم أنَّ التصادمات المجرية ضرورية لتكوين الكواكب، وإن كان علماء الفلك يعتقدون بالفعل أنها واحدةٌ من الأسباب الأربعة الأساسيَّة لتكوين النجوم. تختلف النظرية الحالية بشأن تكوين نظامنا الشمسي والعديد من الأنظمة الكوكبية الأخرى عن ذلك، لكنها لا تقل تشويقًا عن تلك الفقرة الافتتاحية. وهي تتمثَّل فيما يلي.

قبل أربعة ملياراتٍ ونصف مليار[1] من الأعوام، بدأت غيمةٌ من غاز الهيدروجين تمتد بعرض ١٠٠ تريليون كيلومتر، في تمزيق نفسها إلى قطعٍ على مهل. تكثفت كل قطعة منها

لتكوِّن نجمًا. ومن مثل هذه القطع، وأقصد السديم الشمسي، تكوَّنت الشمس بنظامها الشمسي الذي يتألَّف من ثمانية كواكب، منها خمسة كواكب قزمة (حتى الآن)، مع الآلاف من الكويكبات والمذنَّبات. والصخرة الثالثة من الشمس، هي موطننا: الأرض.

وعلى عكس الروايات، ربما تكون هذه النظرية صحيحة بالفعل. فلندرس الأدلة.

ظهرت الفكرة القائلة بأنَّ الشمس والكواكب تكثفت كلُّها من غيمة ضخمة من الغاز في وقت مبكر بدرجة ملحوظة، وظلت على مدار وقت طويل هي النظرية العلمية السائدة بشأن نشأتها. وحين ظهرت المشكلات، لم تَعُد تحظى بالتأييد على مدار ٢٥٠ عامًا، لكنها بُعِثت الآن من جديد بفضل بعض الأفكار الجديدة والبيانات.

يشتهر رينيه ديكارت بفلسفته — «أنا أفكِّر، إذن أنا موجود» — وبإسهامه في الرياضيات لا سيما في الهندسة الإحداثية التي تترجم الهندسة إلى جبر، والعكس أيضًا صحيح. غير أنَّ «الفلسفة» في عصره كانت تشير إلى العديد من مجالات النشاط الفكري، ومنها العلوم التي كانت تُسمى بالفلسفة «الطبيعية». وفي كتابه الذي صدر عام ١٦٦٤،[2] «لو موند» (العالَم)، تناول ديكارت أصل النظام الشمسي. وجادل بأنَّ الكون في بدايته كان خليطًا عديم الشكل من الجزيئات التي تدور كالدوامات في المياه. ثمَّة دوامة كبيرة للغاية ظلت تدور عن قرب متزايد، وتقلَّصت لتكوِّن الشمس، وبعض الدوامات الأصغر حولها شكَّلت الكواكب.

شرحت هذه النظرية حقيقتين أساسيتين بضربة واحدة: السبب في وجود العديد من الأجسام المنفصلة في النظام الشمسي، والسبب في دوران الكواكب كلها حول الشمس في الاتجاه نفسه. لا تتفق نظرية ديكارت عن الدوامات مع ما نعرفه الآن عن الجاذبية، لكنَّ قانون نيوتن لم يظهر إلا بعد ذلك بعَقدين. وفي عام ١٧٣٤، اقترح إيمانويل سويدنبورج وجود غيمة من الغاز والغبار بدلًا من نظرية ديكارت عن الدوامات الدوارة. وفي عام ١٧٥٥، منح الفيلسوف إيمانويل كانط، مباركته للفكرة، ثم جاء الرياضي بيير-سيمون دو لابلاس ووصفها بصورة مستقلة عام ١٧٩٦.

لا بد لجميع النظريات التي تتحدَّث عن أصل النظام الشمسي أن تشرح ملاحظتين أساسيتين. أولاهما أنَّ المادة تجمَّعت معًا في أجسام منفصلة: الشمس والكواكب وغير ذلك من الأجسام. أما الملاحظة الثانية الأقل وضوحًا، فهي تتعلق بكمية تُعرف باسم «الزخم الزاوي». وقد ظهرت هذه الملاحظة من الدراسة الرياضية للنتائج الأعمق لقوانين نيوتن للحركة.

يمكن فهم مفهوم الزخم القريب الصلة بسهولة أكبر. وهو يحكم نزعة الجسم إلى الحركة بسرعة ثابتة في خط مستقيم في حالة عدم وجود أي قوة مؤثِّرة، مثلما يذكر قانون نيوتن الأول للحركة. يستخدم المعلِّقون الرياضيون المصطلح بصورة مجازية: «إنها تتمتع بالزخم الآن.» لا تقدِّم التحليلات الإحصائية سوى تأييد ضئيل للغاية على الاقتراح القائل بأنَّ مجموعة من الأهداف الجيدة غالبًا ما تؤدي إلى المزيد منها، ويبرِّر المعلقون فشل استعارتهم بالملاحظة (بعد الحدث) أنَّ الزخم قد فُقِد مجدَّدًا. في علم الميكانيكا، وهي الرياضيات التي تدرس الأجسام والأنظمة المتحركة، يوصَف الزخم بمعنًى محدَّد للغاية، ومن نتائجه أنَّك «لا يمكن» أن تفقد الزخم. كلُّ ما يمكنك فعله هو أن تنقله إلى شيء آخر.

تخيَّل كرة متحركة. ستخبرك سرعتها بمدى السرعة التي تتحرك بها: ٨٠ كيلومترًا في الساعة على سبيل المثال. يركِّز علم الميكانيكا على كمية أهم، وهي السرعة المتجهة التي لا تقيس السرعة فحسب؛ بل الاتجاه أيضًا. إذا كانت لدينا كرة مطاطية تمامًا تقفز عن جدار، فستظل سرعتها ثابتة لكنَّ سرعتها المتجهة ستعكس الاتجاه. وزخم هذه الكرة هو كتلتها مضروبة في سرعتها المتجهة؛ إذن فالزخم أيضًا له حجم واتجاه. إذا تحرَّك جسم خفيف وآخر ثقيل بالسرعة نفسها وفي الاتجاه نفسه، فسوف يكون زخم الجسم الثقيل أكبر. إذن، يلزم فيزيائيًّا بذل قدر أكبر من القوة لتغيير الكيفية التي يتحرك بها الجسم. يمكنك بسهولة أن تضرب كرة تنس طاولة تمر بسرعة ٥٠ كيلومترًا في الساعة، لكن ما من أحد في كامل قواه العقلية سيحاول فعل ذلك مع شاحنة.

إنَّ الرياضيين والفيزيائيين يحبون الزخم لأنه يُحفظ بالرغم من تغيُّر النظام بمرور الوقت، على عكس السرعة المتجهة. معنى هذا أنَّ الزخم الإجمالي للنظام يظل ثابتًا عند الحجم والاتجاه اللذين كان عليهما في البداية أيًّا كانا.

قد يبدو ذلك مستحيلًا. ذلك أنه إذا ارتطمت كرة بجدار وارتدت عنه، فإنَّ اتجاه زخمها يتغير؛ ومن ثمَّ فهو لم يُحفظ. غير أنَّ الجدار الذي هو أثقل كثيرًا، يرتد هو أيضًا شيئًا قليلًا في «الاتجاه المعاكس». بعد ذلك، يأتي دور بعض العوامل الأخرى، مثل طاقة وضع الجدار، وقد احتفظت لنفسي بشرط الخروج، وهو أنَّ قانون الحفظ لا يسري إلا في حالة عدم وجود قوًى خارجية؛ أي تدخلات خارجية. تلك هي الطريقة التي يكتسب بها الجسم زخمه في المقام الأول: أن يدفعه شيءٌ ما.

إنَّ الزخم الزاوي مشابه لهذا، لكنه ينطبق على الأجسام التي تدور لا الأجسام التي تتحرك في خط مستقيم. ليس من السهل تعريف الزخم الزاوي حتى وإن كان ذلك لجزيء

واحد، لكنه يتحدَّد بناءً على كتلة الجزيء وسرعته المتجهة، مثله في ذلك مثل الزخم. أما السمة الأساسية الجديدة، فهي أنه يتحدَّد أيضًا وفقًا لمحور الدوران، وهو الخط الذي يُعد الجسيم يدور حوله. تخيَّل أنَّ لديك خُذْروفًا. وهو يدور حول الخط الذي يقطع القمة في المنتصف؛ ومن ثمَّ فإنَّ جميع جسيمات المادة الموجودة في القمة تدور حول هذا المحور. والزخم الزاوي للجسيم الذي يدور حول هذا المحور هو معدل دورانه مضروبًا في كتلته. غير أنَّ الاتجاه الذي يشير إليه الزخم الزاوي، هو «باتجاه محور الدوران». ومعنى هذا أنه عند الزوايا القائمة على المستوى الذي يتحرك فيه الجسيم. ويُحسب الزخم الزاوي للقمة بأكملها، والذي نؤكد مجددًا على أنه يتحدَّد وفقًا للمحور، من خلال إضافة جميع كميات الزخم الزاوية للجسيمات المكوِّنة لها معًا، مع أخذ الاتجاه في الاعتبار حين يكون ذلك ضروريًّا.

يخبرنا الحجم الإجمالي للزخم الزاوي لنظامٍ يدور حول نفسه، بمدى القوة التي يدور بها، ويخبرنا اتجاه الزخم الزاوي بالمحور الذي يدور حوله، في المتوسط.[3] يُحفظ الزخم الزاوي في أي نظام من الأجسام لا يخضع لأي قوى ليٍّ خارجية (بالمصطلحات التقنية: عزم الدوران).

تنطوي هذه الحقيقة المفيدة الصغيرة على نتائج مباشرة تتعلَّق بانهيار الغيمة الغازية: بعضها جيد وبعضها سيئ.

النتيجة الجيدة هي أنه بعد الاضطراب الأولي، تنزع جزيئات الغاز إلى الدوران في مستوًى مفرد. في البداية، يتمتَّع كل جزيءٍ بمقدارٍ معيَّنٍ من الزخم الزاوي حول مركز جاذبية الغيمة. وعلى عكس قمة الخُذْروف، غيمة الغاز ليست صلبة؛ لذا فإنَّ السرعات والاتجاهات تتنوَّع تنوعًا كبيرًا على الأرجح. من المستبعد أن تكون جميع هذه الكميات متساويةً تمامًا؛ ومن ثمَّ فالزخم الزاوي الابتدائي للغيمة لا يساوي الصفر. إذن، فالزخم الزاوي الإجمالي يُشير في اتجاهٍ ما محدَّد، وله حجم محدَّد. يخبرنا قانون الحفظ أنه بالرغم من تطوُّر غيمة الغاز تحت تأثير الجاذبية، فإنَّ زخمها الزاوي الإجمالي «لا يتغير». ومن ثمَّ يبقى اتجاه المحور ثابتًا متجمدًا على ما كان عليه في اللحظة التي تكوَّنت فيها الغيمة في البداية. وحتى الحجم، أو الكمية الإجمالية للدوران مثلما يمكن أن نقول، هو أيضًا ثابت. ما يمكن أن يتغيَّر هو توزيع جزيئات الغاز. يبذل كل جزيء من جزيئات الغاز قوة جذب على كل جزيء آخر، وتنهار غيمة الغاز التي كانت كرويةً فوضوية في بادئ الأمر، لتشكِّل قرصًا مسطحًا، يدور حول المحور مثلما يدور طبق على عمود في السيرك.

تُعد هذه الأخبار جيدةً لنظرية السديم الشمسي؛ لأنَّ جميع كواكب النظام الشمسي لها مداراتٌ تقع قريبًا جدًّا من المستوى نفسه — مدار الشمس — وجميعها يدور في الاتجاه نفسه. ولهذا السبب خمَّن علماء الفلك الأوائل أنَّ الشمس والكواكب جميعها قد تكثَّفت من غيمةٍ من الغاز، بعد أن انهارت لتشكِّل قرصًا كوكبيًّا بدائيًّا.

من المؤسف لهذه «الفرضية السديمية»، أنه توجد أيضًا بعض الأنباء السيئة؛ ذلك أنَّ ٩٩٪ من الزخم الزاوي للنظام الشمسي يتبقَّى في الكواكب، ولا يتبقَّى منه في الشمس سوى ١٪. وبالرغم من أنَّ الشمس تمثِّل كتلة النظام الشمسي بأكملِه تقريبًا، فهي تدور ببطءٍ بعض الشيء، وجسيماتها قريبة نسبيًّا من المحور المركزي. وبالرغم من أنَّ الكواكب أخف، فهي أبعد كثيرًا وتتحرك بسرعةٍ أكبر؛ لذا فهي تستحوذ على الزخم الزاوي بأكمله تقريبًا.

غير أنَّ الحسابات النظرية المفصَّلة توضح أنَّ غيمة غاز منهارة لا تؤدي إلى هذا. تلتهم الشمس غالبية المادة في غيمة الغاز بأكملها، بما في ذلك ما كان بعيدًا للغاية عن المركز في الأصل. ومن ثمَّ يتوقَّع المرء أنها كانت ستلتهم نصيب الأسد من الزخم الزاوي، وهو ما فشلت فيه على نحوٍ مدهش. بالرغم من ذلك، فالتوزيع الحالي للزخم الزاوي، الذي تحصل فيه الكواكب على نصيب الأسد، يتسق تمامًا مع ديناميكيات النظام الشمسي. إنها ديناميكيَّات «ناجحة»، وقد ظلَّت ناجحةً على مدار مليارات الأعوام. ما من مشكلةٍ منطقية في هذه الديناميكيات مثلما هي عليه الآن؛ بل المشكلة مع الكيفية التي بدأت بها فحسب.

سرعان ما ظهرت طريقة محتملة للخروج من هذه المعضلة. فلنفترض أنَّ الشمس تكوَّنت «أولًا». بعد ذلك، التهمت جميع الزخم الزاوي الموجود في غيمة الغاز تقريبًا؛ لأنها التهمت الغاز بأكمله تقريبًا. تمكَّنت بعد ذلك من اكتساب الكواكب عن طريق «أسر» كتل المادة التي كانت تمر على مقربة. إذا كانت هذه الكتل بعيدة عن الشمس بالدرجة الكافية، وكانت تتحرك بالسرعة الصحيحة لأسرها، فستكون نسبة ٩٩٪ متلائمة مع النظام، مثلما هي اليوم.

غير أنَّ المشكلة الأساسية في هذا التصور هي الصعوبة الكبيرة في أسر كوكب. فأي جسم سيصبح كوكبًا فيما بعدُ يقترب بالدرجة الكافية، سيزيد من سرعته مع اقترابه من الشمس. وإذا تمكَّن من عدم السقوط في الشمس، فسوف يتأرجح حولها، ثم يرتد إلى الخارج من جديد. لمَّا كان من الصعب أسر كوكب واحد، فما بالك بثمانية؟

في عام ١٧٤٩، فكَّر كونت بوفون أنه ربما اصطدم مذنَّب ما بالشمس، وبعثر منها ما يكفي من المادة لتشكيل الكواكب. غير أنَّ لابلاس قد نفى ذلك عام ١٧٩٦؛ فكواكب تشكَّلت بتلك الطريقة كانت ستسقط مرة أخرى في الشمس. إنَّ هذا التبرير المنطقي شبيه بحجة «إنكار الأسر»، لكن في الاتجاه المعاكس. ليس الأسر بالأمر السهل لأنَّ ما ينخفض لا بد أن يرتفع مرة أخرى (ما لم يرتطم بالشمس وتبتلعه.) والبعثرة ليست بالأمر السهل؛ لأن ما يرتفع لا بد أن ينخفض. على أية حال، صرنا نعرف الآن (ما لم يكن معروفًا آنذاك) أنَّ المذنَّبات أخف كثيرًا من أن تبعثر أجسامًا في حجم الكواكب، وأنَّ الشمس تتكوَّن من المواد الخطأ.

في عام ١٩١٧، اقترح جيمس جينز نظرية المد التي تقول بأنَّ نجمًا متجولًا مرَّ بالقرب من الشمس وامتص بعضًا من مادتها في سيجار طويل نحيف. بعد ذلك، انفجر ذلك السيجار الذي لم يكن مستقرًّا إلى قطعٍ أصبحت هي الكواكب فيما بعد. مرة أخرى نجد أنَّ الشمس تتكوَّن من التركيب الخطأ، ثم إنَّ هذا الاقتراح يستلزم حدوث تصادم قريب مستبعد بدرجة كبيرة، وهو لا يزود الكواكب الخارجية بمقدار الزخم الزاوي الذي يكفي لإيقافها من السقوط للخلف. طُرِحت عشرات النظريات، كلها مختلفة لكنها في الوقت نفسه لم تكن سوى تنويعات على أفكار متشابهة. كل منها يلائم بعض الحقائق ويواجه صعوبة في تفسير البعض الآخر.

بحلول عام ١٩٧٨، صارت نظرية السديم التي كانت قد فقدت مصداقيتها فيما يبدو، رائجة من جديد. توصَّل أندرو برينتيس إلى حل منطقي لمشكلة الزخم الزاوي؛ تذكر أنَّ الزخم الزاوي للشمس قليل للغاية بينما هو كثير للغاية لدى الكواكب. ما نحتاج إليه هو طريقة تحول دون حفظ الزخم الزاوي؛ أي أن يزيد أو يقل. فاقترح برينتيس أنَّ حبات من الغبار تتركز بالقرب من مركز قرص الغاز، ويؤدي الاحتكاك مع تلك الحبات إلى إبطاء دوران الشمس المتكثفة حديثًا. طوَّر فيكتور سافرونوف أفكارًا مشابهة في الوقت نفسه تقريبًا، وقد أدَّى كتابه عن هذا الموضوع إلى الانتشار الواسع لنظام «القرص المنهار»، الذي يقول بأنَّ الشمس والكواكب (والكثير من الأجسام الأخرى) كلها قد تكثفت من غيمة غازية ضخمة واحدة تمزقت إلى كتل مختلفة الأحجام بفعل جاذبيتها، وعدَّلها الاحتكاك.

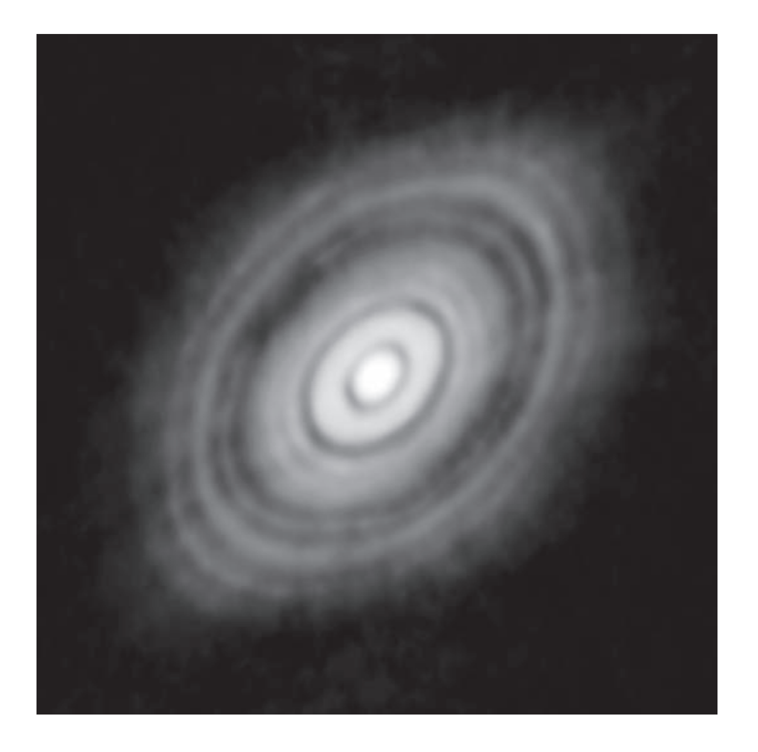
تتميز هذه النظرية بتفسير السبب في أنَّ الكواكب الداخلية (عطارد والزهرة والأرض والمريخ) صخرية بصفة أساسية، بينما الكواكب الخارجية (المشتري وزحل

وأورانوس ونبتون) عملاقة غازية وثلجية. فالعناصر الأخف في القرص الكوكبي البدائي ستتراكم في مكانٍ أبعدَ من ذلك الذي ستتراكم فيه العناصر الثقيلة، مع قدرٍ كبير من الامتزاج المضطرب بالطبع. تتمثَّل النظرية السائدة بشأن الكواكب العملاقة في أنَّ اللب الصخري قد تكوَّن أولًا، ثم سحبت جاذبيته الهيدروجين والهيليوم وبعض بخار الماء مع كميات قليلة من المواد الأخرى. غير أنَّ أنظمة تكوين الكواكب قد واجهت صعوبة في إعادة إنتاج هذا السلوك.

في عام ٢٠١٥، قام هارولد ليفسيون وكاثرين كريتيك ومارتن دانكان، بإجراء نماذج محاكاة حاسوبية تدعم خيارًا بديلًا، وهو أنَّ اللب قد تجمَّع من «حصًى» أو كتلٍ من مواد صخرية يمتد عرضُها إلى متر تقريبًا.[4] من الناحية النظرية، يمكن لهذه العملية أن تشكِّل لبًّا تبلغ كتلته ١٠ أضعاف كتلة الأرض في بضعة آلاف من الأعوام. طرحت نماذج المحاكاة السابقة مشكلةً مختلفة مع هذه الفكرة، وهي أنها تنتج مئات الكواكب في حجم الأرض. أما هذا الفريق فقد أثبت أنه يمكن تجنُّب هذه المشكلة إذا ظهر الحصى إلى الوجود بالبطء الذي يكفي لتفاعله معًا على نحوٍ جذبي. بعد ذلك، يبعثر الحصى الأكبر بقية الحصى خارج القرص. غالبًا ما كانت نماذج المحاكاة التي تَستخدم معلماتٍ مختلفة تنتج ما بين أربعة عمالقة غازية تبعد عن الشمس مسافة تتراوح ما بين ٥–١٥ وحدة فلكية، وهو ما يتسق مع الهيكل الحالي للنظام الشمسي. فوحدة فلكية واحدة هي المسافة التي تبعدها الأرض عن الشمس، وهي طريقة ملائمة لاستيعاب المسافات الكونية الصغيرة نسبيًّا.

ثمَّة طريقة جيدة لاختبار النموذج السديمي، وهي اكتشاف ما إذا كان ثمَّة عمليات مماثلة تجري في مكانٍ آخر في الكون. في عام ٢٠١٤، التقط علماء الفلك صورةً مميزة للنجم الصغير «إتش إل توري»، الذي يقع على بُعد ٤٥٠ سنة ضوئية في كوكبة الثور. تحيط بالنجم حلقات غازية لامعة متحدة المركز، وتتخللها حلقات مظلمة في المنتصف. من المؤكد تقريبًا أنَّ السبب في هذه الحلقات المظلمة هو الكواكب الناشئة تكنس الغبار والغاز. سيكون من الصعب إيجاد دليل أكثر قوة لتأكيد نظرية.

من السهل أن نصدِّق أنَّ الجاذبية تتسبَّب في تجمُّع الأشياء، لكن كيف يمكن أن تُباعد أيضًا بينها؟ فلنضع بعض التخمينات. ومرة أخرى نجد أنَّ بعض الحسابات الرياضية المعقَّدة التي لن نذكرها هنا تؤكد الخلاصة العامة. سأبدأ بتوضيح كيفية التجميع.



صورة مصفوفة مرصد أتاكما المليمتري الكبير للنجم «إتش إل توري»، وتظهر فيها حلقات متحدة المركز تتكوَّن من الغبار، وتتخللها بعض الفجوات.

إنَّ جسمًا غازيًّا تشد جزيئاته بعضها بعضًا على نحوٍ «جذبي»، يختلف تمامًا عن خبرتنا المعتادة بالغازات. ذلك أنك إذا ملأت غرفةً بالغاز، فسوف يبدأ في الانتشار بسرعة كبيرة فتصبح كثافة الغاز متساوية في كل مكان فيها. فأنت لا تجد في غرفة طعامك جيوبًا غريبة فارغة من الهواء. والسبب في هذا أنَّ جزيئات الهواء تتقافز بصورة عشوائية وسرعان ما تملأ أي مكان شاغر. وهذا السلوك منصوص عليه في القانون الثاني الشهير للديناميكا الحرارية، والذي يتمثَّل تفسيره المعتاد في أنَّ الغاز فوضوي بأكبر درجة ممكنة. ومعنى «فوضوي» في هذا السياق، أنَّ كل شيء ينبغي أن يكون ممتزجًا معًا تمام الامتزاج؛ أي لا توجد منطقةٌ ما أكثر كثافة من أي منطقة أخرى.

إنني أرى أنَّ هذا المفهوم، الذي يُعرف تقنيًّا بمصطلح «الإنتروبيا»، مراوغٌ بدرجة كبيرة لا يمكن معها تمثيله بكلمة بسيطة مثل «الفوضى»، وإن لم يكن ذلك لشيء إلا

أن «التساوي في الامتزاج» يبدو لي حالة من «النظام». غير أنني سأمتثل الآن للمنهج التقليدي. الحق أنَّ الصيغة الرياضية لا تذكر النظام ولا الفوضى على الإطلاق، لكنها تقنية للغاية فلا يمكن أن نناقشها الآن.

إنَّ ما ينطبق على غرفةٍ ما، لا بد وأنه ينطبق على غرفة أكبر، فلماذا لا ينطبق على غرفة بحجم الكون بأكمله؟ في الكون نفسه بالفعل؟ لا شك بأنَّ القانون الثاني للديناميكا الحرارية يذكر أنَّ جميع الغاز الموجود في الكون ينبغي أن يوزِّع نفسه بالتساوي على هيئة ضباب خفيف، أليس كذلك؟

لو أنَّ هذا صحيح لأصبحت تلك أخبارًا سيئةً للعِرق البشري؛ لأننا لا نتكون من الضباب الخفيف. فمن الواضح أننا نتكون من كتل، ونعيش على كتلة أكبر تدور بكتلة كبيرة للغاية حتى إنها تتحمَّل تفاعلات نووية نشطة فتنتج الضوء والحرارة. ونجد بالفعل أنَّ الأشخاص الذين يرفضون الوصف العلمي المعتاد لنشأة البشرية غالبًا ما يستدعون القانون الثاني للديناميكا الحرارية كي «يثبتوا» أنَّنا لم نكن لنوجد لولا أنَّ كائنًا فائق الذكاء قد صنعنا قصدًا ورتَّب الكون ليناسب احتياجاتنا.

بالرغم من ذلك، فالنموذج الديناميكي الحراري للغاز الموجود في غرفة، غير مناسب لمعرفة الكيفية التي ينبغي أن يتصرَّف بها السديم الشمسي أو الكون بأكمله. ذلك أنه ينطوي على النوع الخاطئ من التفاعلات. تفترض الديناميكا الحرارية أنَّ الجزيئات لا يلاحظ بعضها بعضًا إلا حين تتصادم، ثم يرتد بعضها عن بعض. يكون الارتداد مرنًا تمامًا بمعنى أنه ما من طاقة تُفقد على الإطلاق؛ لذا تستمر الجزيئات في الارتداد بعضها عن بعض إلى الأبد. من الناحية التقنية، نجد أنَّ القوى التي تحكم تفاعلات الجزيئات في نموذج ديناميكي حراري للغاز، قصيرة المدى وتنافرية.

تخيَّل حفلةً جميعُ مَن فيها معصوب العينين ومسدود الأذنين؛ لذا فإنَّ الطريقة الوحيدة لمعرفةِ ما إذا كان أي شخص آخر حاضرًا، هو الارتطام به. تخيَّل أيضًا أنَّ الجميع معتلون اجتماعيًّا بدرجة كبيرة حتى إنَّه حين يلتقي أحدهم بالآخر، يدفع كلٌّ منهم الآخر على الفور. من المنطقي أنه بعد فترة من التصادم الأولي والتذبذب، سيوزِّعون أنفسهم بالتساوي إلى حدٍّ كبير. لن يحدث هذا طوال الوقت؛ لأنَّ أحدهم قد يقترب من الآخر أحيانًا عن طريق الخطأ، أو حتى يتصادمان، لكنهم يظلون موزَّعين في المتوسط. إنَّ النموذج الديناميكي الحراري للغاز شبيه بهذا، مع وجود أعداد ضخمة من الجزيئات تأخذ دور الأشخاص.

إنَّ غيمة غازية في الفضاء ستكون أكثر تعقيدًا. ترتد الجزيئات بعضها عن بعض حين تتصادم، لكنَّ ثمَّة نوعًا ثانيًا من القوى: الجاذبية. تُغفَل الجاذبية في الديناميكا الحرارية؛ لأنَّ آثارها في هذا السياق لا تكاد تُذكر على الإطلاق. أما في علم الكونيات، فنجد أنَّ الجاذبية عامل مهيمن؛ إذ توجد كمية مهولة من الغاز. تحافظ الديناميكا الحرارية على الحالة الغازية، أما الجاذبية، فهي تحدِّد ما يفعله الغاز على نطاقاتٍ أكبر. الجاذبية قوة طويلة المدى وجاذِبة؛ أي العكس تمامًا من الارتداد المرن. يُقصد بمصطلح «طويلة المدى» أنَّ الأجسام تتفاعَل حتى وبعضها بعيد عن بعض. فجاذبية القمر (والشمس بدرجة أقل) تؤدي إلى حدوث المد والجزر في محيطات الأرض، بالرغم من أنَّ القمر يبعد بمسافة ٤٠٠ ألف كيلومتر. أما مصطلح «جاذبة» فهو مباشر للغاية، ويعني أنها تؤدي إلى اقتراب الأجسام المتفاعلة بعضها من بعض.

يمكننا تشبيه ذلك بحفلةٍ يستطيع جميع مَن فيها رؤية الآخرين جميعًا من الجانب الآخر في الغرفة، وإن كان وضوح الرؤية يقل مع زيادة المسافة، وفور أن يرى أحدهم الآخر، يندفع نحوه. لا غرو في أن تتجمَّع كتلة من الغاز يتفاعل بعضها مع بعض تحت تأثير الجاذبية. في مناطق صغيرة للغاية من التجمعات، يسود النموذج الديناميكي الحراري، لكنَّ النزعة إلى التجمُّع تهيمن على النموذج الديناميكي الحراري في النطاقات الأكبر.

إذا كنا نحاول معرفةَ ما حدث لسديم شمسي افتراضي على نطاق الأنظمة الشمسية أو الكواكب، فعلينا أن نأخذ بعين الاعتبار قوة الجاذبية الجاذِبة طويلة المدى. يمكن للتنافر القصير المدى بين الجزيئات المتصادمة أن يخبرنا شيئًا عن حالة منطقة صغيرة في الغلاف الجوي لكوكبٍ ما، لكنه لن يخبرنا شيئًا عن «الكوكب». الواقع أنه سيضللنا إلى تخيُّل أنَّه ما كان للكوكب أن يتكوَّن أبدًا.[5]

إنَّ التكتل نتيجةٌ حتمية للجاذبية. أما الانتشار المتساوي فهو ليس كذلك.

لَمَّا كانت الجاذبية تتسبَّب في تكتُّل المادة، فكيف يمكن أيضًا أن تباعد بين جزيئات الغيمة؟ يبدو ذلك تناقضًا.

وإجابة هذا السؤال أنَّ الكتل المتنافسة يمكن أن تتشكَّل في الوقت نفسه. فالحجج المنطقية التي تؤيد انهيار غيمة غازية إلى قرص مسطح دوَّار، تفترض أننا بدأنا بمنطقة غازية كروية تقريبًا، ربما تكون شبيهة بكرة القدم الأمريكية لكنها لا تشبه الدمبل.

بالرغم من ذلك، ستضم منطقة كبيرة من الغاز أماكن تتوزَّع بصورة عشوائية وعرضية، يتصادف أن تكون المادة فيها أكثر كثافة مما هي عليه في الأماكن الأخرى. تعمل كل منطقةٍ من تلك المناطق بمثابة مركز، فتجذب المزيد من المادة من محيطها، وتبذل قوة جذب أقوى بدرجةٍ كبيرةٍ للغاية. يبدأ التجمع الناتج عن ذلك في صورةٍ كرويةٍ تقريبًا، ثم ينهار إلى قرصٍ دوَّار.

غير أنه في منطقة غازية كبيرة بالدرجة الكافية، يمكن أن يتشكَّل العديد من مثل هذه المراكز. فبالرغم من أنَّ الجاذبية طويلة المدى، فإنَّ قوَّتها تتضاءل مع زيادة المسافة بين الأجسام. ومن ثَمَّ تنجذب الجزيئات إلى المركز الأقرب. يُحاط كل مركز بمنطقةٍ يسود فيها سحب جاذبيته. إذا كان في الحفلة «شخصان» شهيران، وكلٌّ منهما في ركنٍ مقابل بالغرفة، فسوف تنقسم الحفلة إلى مجموعتين. لذا تنظم غيمة الغاز نفسها إلى مزيجٍ ثلاثي الأبعاد من المراكز الجاذبة. وهذه المناطق تُمزِّق الغيمة عند حدودها المشتركة. ما يحدث في الواقع أكثر تعقيدًا؛ إذ يمكن للجزيئات السريعة الحركة أن تفلت من تأثير المركز الأقرب وينتهي بها المطاف بالقرب من مركزٍ آخر، لكنَّ هذا ما نتوقعه بصورة عامة. يتكثف كل مركزٍ لتكوين نجم، وقد يكوِّن الغبار المحيط به مجموعةً من الكواكب وبعض الأجسام الأصغر.

إنَّ هذا هو السبب في أنَّ غيمةً غازيةً تكون متساوية في البداية، تتكثَّف إلى مجموعةٍ كبيرةٍ من الأنظمة النجمية المستقلة والمنعزلة بعض الشيء. يتطابق كلٌّ من هذه الأنظمة مع أحد المراكز الكثيفة. وحتى حينذاك، لا يكون الأمر مباشرًا تمامًا. إذا كان ثمَّة نجمان قريبان من أحدهما الآخر بالدرجة الكافية، أو يقترب أحدهما من الآخر لأسباب تصادفية، فقد ينتهي بهما الأمر في الدوران حول مركز كتلتهما المشترك. وحينها يشكِّلان نجمًا ثنائيًّا. ويمكن بالفعل أن تظهر أنظمة تتكوَّن من ثلاثة نجوم أو أكثر، ترتبط معًا بعض الشيء بفعل جاذبيتها المشتركة.

إنَّ هذه الأنظمة المتعددة النجوم، لا سيما الثنائية منها، توجد بكثرةٍ في الكون. فالنجم الأقرب للشمس، «بروكسيما سنتوري»، قريب نسبيًّا (في السياق الفلكي) من نظام نجمي ثنائي يُدعى «ألفا سنتوري»، الذي يتكوَّن من النجم «ألفا سنتوري إيه» والنجم «ألفا سنتوري بي». ويبدو من المرجَّح أنَّ «بروكسيما» يدور بهما، لكنه يستغرق على الأرجح نصف مليون عام ليكمل دورة واحدة. فالمسافة بين النجم «إيه» والنجم «بي» تقترب من مقدار المسافة من المشتري إلى الشمس؛ فهي تتراوح بين ١١ وحدة فلكية و٣٦ وحدة فلكية.

على العكس من ذلك، تبلغ المسافة من «بروكسيما» إلى النجم «إيه» أو النجم «بي»، ١٥ ألف وحدة فلكية، فهي أكبر بألف مرةٍ تقريبًا. ولهذا فوفقًا لقانون التربيع العكسي للجاذبية، يبلغ مقدار القوة التي يبذلها النجمان «إيه» و«بي» على «بروكسيما»، واحدًا على المليون من القوة التي يبذلها أحدهما على الآخر. وبخصوص ما إذا كان ذلك المقدار قويًّا بما يكفي لإبقاء «بروكسيما» في مدار مستقر، فهو يتوقَّف بدقةٍ على ما هو موجود بالقرب منه لينتزعه من قبضة «إيه» و«بي» الضعيفة. لن نكون موجودين على أية حال لرؤيةِ ما سيحدث.

لا بد أنَّ التاريخ المبكِّر للنظام الشمسي قد تضمَّن فترات من النشاط العنيف. والدليل على هذا هو عدد الفُوَّهات الضخم الموجود على معظم الأجسام، لا سيما القمر وعطارد والزهرة والعديد من الأقمار الأخرى، مما يوضح أنَّ هذه الأجسام قد رُشِقت بعددٍ لا يُحصى من الأجسام الأصغر. يمكن تقدير الأعمار النسبية للفُوَّهات الناتجة إحصائيًّا؛ إذ إنَّ الفُوَّهات الأحدث تدمِّر جزءًا من الفُوَّهات الأقدم حين تتداخل، ومعظم الفُوَّهات المرصودة على هذه العوالم عتيقة للغاية بالفعل. بالرغم من هذا، تتشكَّل فُوَّهات جديدة في بعض الأحيان، لكن معظمها يكون صغيرًا للغاية.

تتمثَّل المشكلة الكبيرة هنا في ترتيب تسلسل الأحداث التي شكَّلت النظام الشمسي. في ثمانينيات القرن العشرين، مكَّننا اختراعُ أجهزة الكمبيوتر القوية الفعالة والطرق الحسابية الدقيقة، من تصميم نماذج حسابية تفصيلية للغيوم المنهارة. ومن الضروري توفُّر قدرٍ من التعقيد لأنَّ الطرق العددية البسيطة لا تراعي القيود الفيزيائية مثل حفظ الطاقة. إذا كانت هذه الأداة الرياضية تتسبَّب في نقص الطاقة ببطء، يكون التأثير شبيهًا بالاحتكاك. وبدلًا من اتباع مدار مغلق، يسير الكوكب ببطء في مدار لولبي باتجاه الشمس. ينبغي حفظ الكميات الأخرى أيضًا، مثل الزخم الزاوي. لم يتوصَّل العلماء إلى الطرق التي تتجنَّب هذا الخطر إلا قبل وقت قصير. تُعرف الطرق الأدق من بينها بطرق التكامل التماسكي، وقد اتخذت هذا الاسم من طريقة تقنية لإعادة صياغة معادلات الميكانيكا، وهي تحفظ جميع الكميات الفيزيائية المعنية «بالضبط». تكشف نماذج المحاكاة الدقيقة المضبوطة عن آليات منطقية ومثيرة للغاية بشأن تكوُّن الكواكب، وهي تلائم الملاحظات على نحوٍ جيد. وفقًا لهذه الأفكار، كان النظام الشمسي الأولي شديد الاختلاف عن ذلك النظام الشمسي الهادئ الذي نراه اليوم.

كان علماء الفلك يظنون أنَّ النظام الشمسي صار مستقرًّا للغاية فور أن أتى إلى الوجود. ظلت الكواكب تدور بروية في مداراتها المقدرة مسبقًا، ولم يتغير الكثير؛ فالنظام العجوز الذي نراه اليوم، شديد الشبه بما كان عليه في شبابه. غير أنهم لم يعودوا يعتقدون ذلك الآن! صاروا الآن يعتقدون أنَّ العملاقين الغازيين؛ المشتري وزحل، والعملاقين الثلجيين؛ أورانوس ونبتون، ظهرت أولًا خارج «خط الجليد» حيث تتجمَّد المياه، لكنها أعادت تنظيم بعضها بعضًا بعد ذلك في صراع تجاذبي طويل. أثَّر هذا في جميع الأجسام الأخرى، وكان التأثير كبيرًا في معظم الأحوال.

قادتنا النماذج الرياضية إضافةً إلى مجموعة متنوعة من الأدلة الأخرى المستمدة من الفيزياء النووية والفيزياء الفلكية والكيمياء وغير ذلك من فروع العلم، إلى الصورة الحالية: لم تتشكَّل الكواكب على هيئة كتل منفصلة متماسكة؛ بل بعملية فوضوية من التراكم. فعلى مدار أول ١٠٠ ألف عام، راحت «الجسيمات الكوكبية» النامية ببطء، تكتسح الغاز والغبار وشكَّلت في السديم حلقات دائرية عن طريق تكوين فراغات فيما بينها. امتلأت كل فجوة بالملايين من هذه الأجسام الضئيلة. في تلك المرحلة، لم يَعُد لدى الجسيمات الكوكبية أي مواد جديدة تكتسحها، لكنَّ عددها كان كبيرًا للغاية حتى إنها كانت ترتطم بعضها ببعض. انشطر بعضها، لكن البعض قد اندمج؛ ففازت الأجسام المندمجة وتراكمت الكواكب قطعة بقطعة.

في هذا النظام الشمسي المبكِّر، كانت بعض الكواكب العملاقة أقرب لبعض بأكثرَ مما هي عليه اليوم، وكانت الجسيمات الكوكبية تجوب المناطق الخارجية. نجد اليوم أنَّ ترتيب الكواكب العملاقة من الشمس إلى الخارج هو المشتري، زحل، أورانوس، نبتون. غير أنَّ أحد التصورات المحتملة تقول بأنه كان في الأصل على النحو التالي: المشتري، نبتون، أورانوس، زحل. وحين صار عمر النظام الشمسي ٦٠٠ مليون عام تقريبًا، انتهى هذا الترتيب المريح. كانت جميع الفترات المدارية للكواكب تتغيَّر ببطء، وصار المشتري وزحل في حالة رنين مداري بنسبة ١:٢؛ أي صارت «سنة» المشتري تساوي نصف سنة زحل بالضبط. تحدث حالات الرنين بصفة عامة حين توجد فترتان مداريتان أو فترتا دوران، يمكن تمثيل العلاقة التي تربط بينهما بكسر بسيط، وهو نصف في هذه الحالة.[6] لحالات الرنين تأثير قوي على الديناميكيات السماوية؛ لأنَّ الأجسام التي توجد في رنين مداري تصطف مرارًا وتكرارًا بالطريقة نفسها تمامًا، وسوف أذكر المزيد عنها لاحقًا. يحول هذا دون «توزُّع» الاضطرابات على مدار فترات طويلة من الوقت. وهذه الحالة المحدَّدة من الرنين دفعت نبتون وأورانوس إلى الخارج، وحلَّ نبتون محل أورانوس.

أدَّى هذا الترتيب الجديد للأجسام الأكبر في النظام الشمسي، إلى توزيع الجسيمات الكوكبية، وتسبَّب في سقوطها باتجاه الشمس. حلَّت حالة عارمة من الفوضى إذ راحت الجسيمات الكوكبية تلعب لعبة الكرة والدبابيس السماوية بين الكواكب. تحرَّكت الكواكب العملاقة إلى الخارج، وانتقلت الجسيمات الكوكبية إلى الداخل. وفي نهاية المطاف، تنافست الجسيمات الكوكبية مع المشتري الذي كانت كتلته الضخمة عاملًا حاسمًا. لُفِظت بعض الجسيمات الكوكبية خارج النظام الشمسي بأكمله، بينما ذهب بعضها في مدارات طويلة نحيفة تمتد إلى مسافات ضخمة. بعد ذلك، استقر كل شيء بدرجة كبيرة، غير أنَّ القمر وعطارد والمريخ لا تزال تحمل ندبات المعارك التي نتجت عن هذه الفوضى.[7] وتوزَّعت الأجسام من جميع الأشكال والأحجام والتركيبات في كل مكان.

استقرَّ كل شيء «بدرجة كبيرة». غير أنه لم يتوقَّف. في عام ٢٠٠٨، أجرى قسطنطين باتيجين وجريجوري لافلين نموذج محاكاة لمستقبل النظام الشمسي على مدار ٢٠ مليار عام، ولم تكشف النتائج الأولية عن اضطرابات شديدة.[8] ومع تعديل الطريقة العددية للبحث عن أي اضطرابات محتملة، ومع تغيير مدار كوكب واحد على الأقل بطريقة أساسية، اكتشفا تصورًا محتملًا للمستقبل يصطدم فيه عطارد بالشمس بعد ما يقرب من ١٫٢٦ مليار عام من الآن، وتصورًا آخر تؤدي فيه حركات عطارد غير المنتظمة إلى لفظ المريخ من النظام الشمسي بعد ٨٢٢ مليون عام من الآن، ويتبع ذلك تصادم بين عطارد والزهرة بعد ٤٠ مليون عام أخرى. غير أنَّ الأرض تستمر في الإبحار بسكينة دون أن تتأثَّر بكل هذه الأحداث المثيرة.

كانت نماذج المحاكاة المبكِّرة تَستخدم في المجمل معادلات تقريبية غيرَ ملائمة للتصادمات، وتغفل الآثار النسبية. وفي عام ٢٠٠٩، أجرى جاك لاسكار ومايكل جاستينو نموذج محاكاة لخمسة مليارات عام تالية، باستخدام طريقة تجنَّبت هذه المشكلات،[9] لكنَّ النتائج جاءت هي نفسها تقريبًا. لأنَّ الاختلافات الضئيلة في الظروف الأولية يمكن أن تخلِّف أثرًا كبيرًا في الديناميكيات على المدى الطويل، قاما بمحاكاة ٢٥٠٠ من المدارات تبدأ كلها بخطأ في رصد الظروف الحالية. وفي ٢٥ من الحالات تقريبًا، يضخِّم الرنين القريب الانحراف المداري لعطارد، مما يؤدي إلى تصادم مع الشمس، أو تصادم مع الزهرة، أو لقاء قريب يغيِّر مدارَي عطارد والزهرة كليهما تغييرًا جذريًّا. في حالة واحدة، يصبح مدار عطارد أقل انحرافًا؛ فيتسبَّب في زعزعة استقرار الكواكب الداخلية الأربعة على مدار ٣٫٣ مليارات عام قادمة. من المرجَّح بعد ذلك أن تصطدم الأرض بعطارد أو الزهرة أو المريخ. ومرة أخرى، يظهر احتمال طفيف بلفظ المريخ من النظام الشمسي بأكمله.[10]

الفصل الثالث

قمر متقلب

«إنه خطأ القمر: يقترب من الأرض أكثر مما ينبغي له، ويصيب البشر بالجنون.»

ويليام شيكسبير، «عطيل»

قمرنا كبير للغاية.

إنَّ قطره يزيد عن ربع قطر الأرض؛ فهو أكبر من غالبية الأقمار الأخرى: الحق أنه كبير للغاية حتى إنَّ نظام الأرض-القمر يُسمى أحيانًا بالكوكب المزدوج. (بالمصطلحات التقنية: تُسمى الأرض بالكوكب الرئيس، والقمر بالتابع.) ما من أقمار تدور بعطارد أو بالزهرة، بينما يدور بالمريخ، وهو الكوكب الأكثر شبهًا بالأرض، قمران صغيران. يمتلك المشتري، أكبر كواكب النظام الشمسي، ٦٧ قمرًا معروفًا، لكنَّ ٥١ منها لا يزيد قطر كلٍّ منها عن ١٠ كيلومترات. حتى القمر الأكبر، جانيميد، يقل حجمه عن واحدٍ على ١٣ من حجم المشتري. يُعد زُحل الأغزر في حصص الأقمار التابعة؛ إذ يدور به ما يزيد عن ١٥٠ من الأقمار والقميرات ونظام ضخم ومعقَّد من الحلقات. غير أنَّ قمره الأضخم، تيتان، لا يبلغ حجمه سوى واحد على ٢٠ من حجم زحل، وهو الكوكب الرئيس في النظام. لأورانوس ٢٧ قمرًا معروفًا، أكبرها تيتانيا الذي يقل قطره عن ١٦٠٠ كيلومتر. أما نبتون، فقمره الوحيد الكبير هو تريتون الذي يبلغ حجمه واحدًا على ٢٠ من حجم الكوكب، وإضافةً إليه، وجد علماء الفلك ١٣ قمرًا آخرَ صغيرًا للغاية. من بين جميع عوالم النظام الشمسي، وحده بلوتو هو الأفضل منا؛ فأربعة من أقماره صغيرة للغاية لكنَّ الخامس، شارون، يبلغ نصف حجم كوكبه الرئيس.

يُعد نظام الأرض-القمر غير مألوف في جانبٍ آخر أيضًا: وهو زخمه الزاوي الكبير للغاية. من الناحية الديناميكية، مقدار «الدوران» فيه أكبر مما ينبغي. ثمَّة مفاجآت أخرى

بشأن القمر أيضًا، وسوف نتناولها في الوقت المناسب. إنَّ الطبيعة الاستثنائية للقمر تزيد من أهمية سؤال آخر تلقائي: كيف اكتسبت الأرض تابعها؟

درامية هي النظرية التي تتناسب مع الأدلة الحالية على أفضل نحو، وهي فرضية الاصطدام العملاق. ففي بداية تكوُّنه، كان حجم كوكبنا أصغر مما هو عليه الآن بمقدار ١٠٪، ثم ارتطم به جسم في حجم المريخ تقريبًا، وبعثر منه كميات ضخمة من المادة — كان الكثير منها صخورًا منصهرة في البداية — على شكل كريات من جميع الأحجام اتحد العديد منها عندما بدأت الصخور تبرد. اتحد جزء من الجسم المصادِم مع الأرض التي أصبحت أكبر. وجزء آخر منه صار القمر. أما البقية، فقد توزَّعت في مكانٍ ما بالنظام الشمسي.

تؤيد نماذج المحاكاة الرياضية سيناريو الاصطدام العملاق؛ إذ إن النظريات الأخرى أقل جودة. بالرغم من ذلك، فقد بدأت فرضية الاصطدام العملاق تواجه في السنوات الأخيرة بعض المشكلات، في نسختها الأصلية على الأقل. قد يكون أصل القمر ما يزال متاحًا للتنافس عليه.

تتمثَّل النظرية الأبسط في أنَّ القمر قد تراكم من السديم الشمسي مع كل شيء آخر، في أثناء تكوُّن النظام الشمسي. كان يوجد الكثير من الغبار في مجموعة ضخمة من الأحجام. وحين بدأ هذا الغبار في الاستقرار، تكوَّنت منه كتل أكبر عن طريق جذب الكتل الأصغر التي اتحدت معها بعد تصادمات. لقد تكوَّنت الكواكب بهذه الطريقة، وكذلك الكويكبات والمذنَّبات والأقمار أيضًا. لذا؛ فمن المحتمل أن يكون قمرنا قد تكوَّن بهذه الطريقة.

غير أنه حتى إذا كان ذلك صحيحًا، فإنه لم يتكوَّن في أي مكان قريب من مداره الحالي. فالمشكلة العويصة هي الزخم الزاوي؛ إذ يوجد الكثير جدًّا منه. ومن المشكلات الأخرى أيضًا، بنية القمر. فبعد تكثُّف السديم الشمسي، كان يوجد الكثير من العناصر التي على مسافات مختلفة. ظلت العناصر الأثقل بالقرب من الشمس، بينما أطاح الإشعاع بالعناصر الأخف بعيدًا. وهذا هو السبب في أنَّ الكواكب الداخلية صخرية تتكوَّن ألبابها من الحديد والنيكل، بينما تتكوَّن الكواكب الخارجية بصفة أساسية من الغاز والجليد الذي هو في الأصل غازٌ صار باردًا للغاية حتى تجمَّد. إذا كانت الأرض والقمر قد تكوَّنا على المسافة نفسها تقريبًا من الشمس، وفي الوقت نفسه تقريبًا، فيجب أن يحتويا على صخور متشابهة وبنسب متشابهة. غير أنَّ لب القمر الحديدي أصغر كثيرًا من لب الأرض.

حقيقة الأمر أنَّ النسبة الإجمالية للحديد في الأرض تبلغ ثمانية أضعاف نظيرتها على القمر.

في القرن التاسع عشر، توصَّل جورج، نجل تشارلز داروين، إلى نظرية أخرى، وهي أنَّ الأرض في بداية أيامها كانت ما تزال منصهرة وتدور بسرعة كبيرة للغاية حتى إنَّ جزءًا منها قد انشطر بفعل تأثير قوة الطرد المركزي. أجرى الحسابات باستخدام ميكانيكا نيوتن، وتنبأ بأنَّ القمر يبتعد ولا بد عن الأرض، وهو ما يتضح أنه صحيح بالفعل. إنَّ حدثًا كهذا كان ليخلِّف ندبة كبيرة، وقد كان لدينا مرشَّح واضح: المحيط الهادي. غير أننا نعرف الآن أنَّ صخور القمر أقدمُ كثيرًا من مواد القشرة المحيطية الموجودة في الهادي. وصحيح أنَّ هذا يستبعد المحيط الهادي، لكنه لا يستبعد بالضرورة نظرية الانشطار التي وضعها داروين.

اقتُرِحت العديد من التصورات الأخرى، وبعضها جامح بعض الشيء. ربما كان ثمَّة مفاعل نووي طبيعي (ونحن نعرف أنَّ واحدًا على الأقل كان موجودًا بالمناسبة)،[1] وصار في مرحلة حرجة وانفجر، وأخرج المادة القمرية. لو كان المفاعل بالقرب من الحد الواقع بين الوشاح واللب، بالقرب من خط الاستواء، لذهب الكثير من صخور الأرض إلى المدار الاستوائي. أو ربما كان للأرض قمران في بداية الأمر وتصادما. أو ربما سرقنا قمرًا من الزهرة، مما يمثِّل تفسيرًا وجيهًا لعدم وجود قمر له. غير أنَّه إذا كانت هذه النظرية صحيحة؛ فهي لا تفسِّر السبب في عدم وجود قمرٍ للأرض في الأصل.

ثمَّة بديل أقل إثارة يتمثَّل في أنَّ الأرض والقمر تكوَّنا، كلٌّ على حدة، لكنَّ القمر اقترب من الأرض بالدرجة الكافية فيما بعد، وأَسَرته جاذبيتها. يوجد العديد من الأمور التي تؤيد هذه النظرية. فحجم القمر مناسب، وهو يوجد في مدار متوقَّع. إضافةً إلى ذلك، يفسِّر الأسر السبب في أنَّ القمر والأرض في حالة «تقييد مدي» بفعل جاذبيتهما المشتركة؛ لذا دائمًا ما يقابل الأرض الوجه نفسه من القمر. إنه يتأرجح بعض الشيء (المصطلح التقني: ميسان)، لكنَّ ذلك معتاد مع التقييد المدي.

المشكلة الأساسية هنا هي أنه بالرغم من منطقيةِ خيارِ أسْرِ الجاذبية (فالأجسام يجذب بعضها بعضًا على أية حال)، فإنه استثنائي بعض الشيء في الواقع. نادرًا ما تنطوي حركة الأجسام السماوية على أي احتكاك، يوجد مقدار منه بالتأكيد، في الرياح الشمسية على سبيل المثال لكن آثاره الديناميكية طفيفة؛ لذا تُحفظ الطاقة. فالطاقة (الحركية) التي يكتسبها جسم «ساقط» مع اقترابه من جسم آخر، مسحوبَيْن بفعل

تفاعل الجاذبية بينهما، تكون كافية لأن «يفلت» الجسم من تلك السحبة مجددًا. عادةً ما يقترب الجسمان من أحدهما الآخر، ويتأرجحان حول أحدهما الآخر، ويفترقان.

أو يتصادمان بدلًا من ذلك.

من الواضح أن الأرض والقمر لم يفعلا أيًّا من الخيارين.

ثمَّة طرقٌ للتغلب على هذه المشكلة. ربما كان الغلاف الجوي للأرض في مرحلتها المبكرة ضخمًا وشاسعًا؛ مما أبطأ القمر حين اقترب، دون أن يكسره. توجد سابقة لهذا؛ فقمر نبتون المسمَّى «تريتون» ليس استثنائيًّا في حجمه مقارنةً بالكوكب فحسب؛ بل في اتجاه حركته أيضًا، وهي حركة «ارتجاعية»، أي في الاتجاه المعاكس لحركة معظم أجسام النظام الشمسي، بما في ذلك جميع الكواكب. يعتقد علماء الفلك أنَّ نبتون هو الذي أسرَ تريتون. لقد كان تريتون في الأصل من أجسام حزام كايبر، وهو الاسم الذي يُطلق على حشد من الأجسام الصغيرة التي تدور خارج مدار نبتون. إنه يتشارك في هذا الأصل مع بلوتو على الأرجح. وإذا كان الأمر كذلك، فحوادث الأسر تقع بالفعل.

ثمَّة ملاحظة أخرى تقيِّد الاحتمالات بدرجة أكبر. فبالرغم من أنَّ البنية الجيولوجية العامة للأرض تختلف أشد الاختلاف عن البنية الجيولوجية العامة للقمر، نجد أنَّ البنية الجيولوجية المفصَّلة لصخور سطح القمر تتشابه على نحوٍ ملحوظ مع دثار الأرض. (يقع الدثار بين القشرة القارية واللب الحديدي.) فللعناصر «نظائر» تكاد تكون متطابقة في التركيب الكيميائي لكنها تختلف في الجسيمات التي تكوِّن النواة الذرية. أكثر نظائر الأكسجين شيوعًا هو أكسجين ١٦ الذي يمتلك ثمانية بروتونات وثمانية نيوترونات. أما أكسجين ١٧ فيمتلك نيوترونًا إضافيًّا، ويمتلك أكسجين ١٨ نيوترونًا إضافيًّا ثانيًا. حين تتكوَّن الصخور، يُدمج الأكسجين فيها من خلال التفاعلات الكيميائية. وقد اتضح أنَّ عينات صخور القمر التي أحضرها روَّاد فضاء «أبولو» تحتوي على نسب الأكسجين ونظائره التي تحتوي عليها طبقة دثار الأرض.

في عام ٢٠١٢، قام راندال بانييلو وزملاؤه بتحليل نظائر الزنك في المادة القمرية، ووجدوا أنَّ نسبة الزنك الموجودة بها أقل من تلك التي توجد في الأرض، لكنها تحتوي على نسبة أعلى من نظائر الزنك الثقيلة. لقد استنتجوا أنَّ القمر فقدَ الزنك بالتبخر.[2] ومرة أخرى عام ٢٠١٣، ذكر فريق بقيادة ألبرتو سال أنَّ ذرات الهيدروجين الموجودة في الزجاج البركاني القمري والأوليفين تحتوي على نسب نظائر شديدة الشبه بتلك الموجودة في مياه الأرض. إذا كان الأرض والقمر قد تكوَّنا في الأصل، كلٌّ على حدة، فمن غير المرجَّح أن تكون نسب النظائر فيهما على هذه الدرجة من التشابه.

إنَّ التفسير الأبسط هو أنَّ هذين الجسمين لهما أصل مشترك، بالرغم من الاختلافات بين لبِّيهما. غير أنه ثمَّة خيار بديل: ربما تكوَّنا، كلٌّ على حدة، وكانت بنيتهما مختلفةً حين تكوَّنا، لكنهما امتزجا معًا بعد ذلك.

لنُراجع الدليل الذي يستدعي التفسير. يتمتع نظام الأرض–القمر بزخم زاوي كبير للغاية. تحتوي الأرض على حديدٍ أقلَّ مما يحتوي عليه القمر، لكنَّ سطح القمر يحتوي على نسب نظائر شديدة الشبه بتلك الموجودة في دثار الأرض. القمر كبير للغاية، ويرتبط بالتقييد المدي مع كوكبه. وسيكون على أي نظرية قابلة للتطبيق أن تفسِّر هذه الملاحظات أو تكون متسقة معها على الأقل، كي تكون مقبولة بحدٍّ أدنى. و«جميع» النظريات البسيطة لا توفِّر ذلك. إنَّ الأمر يشبه عبارة شيرلوك هولمز المتداولة: «حين تستبعد المحال، فلا بد أن يكون ما يتبقَّى لديك، أيًّا ما كان، هو الحقيقة.» والتفسير الأبسط الذي يلائم الدليل، هو شيء كان علماء الفلك حتى نهايات القرن العشرين سيرفضونه لأنه بدا غير محتمل الوقوع. يتمثَّل هذا التفسير في أنَّ الأرض تصادمت مع شيء آخر ضخم للغاية حتى إنَّ التصادم صهر كِلا الجسمين. تبعثرت بعض الصخور لتكون القمر، وما اتحد مع الأرض منها كوَّن الجزء الأكبر من دثار الأرض.

تعود فرضية الاصطدام العملاق في نسختها الحالية المفضَّلة إلى عام ١٩٨٤. وقد اتخذ الجسم المصادِم اسمًا أيضًا: «ثيا». غير أنَّ أحاديات القرن قد اتخذت اسمًا وليس لها من وجود. إذا كان لثيا أيُّ وجود على الإطلاق، فلن توجد آثاره المتبقية إلا على القمر أو في باطن الأرض؛ لذا فلا بد أن يكون الدليل غير مباشر.

قليلة هي الأفكار التي تتسم بالأصالة الحقة، ويعود تاريخ هذه الفكرة على الأقل، إلى ريجينالد دالي الذي اعترض على نظرية داروين للانشطار؛ لأنه عند القيام بالحسابات على النحو الملائم، لا يمكن تتبُّع مسار المدار الحالي للقمر إلى الأرض حين تعود بالزمن إلى الوراء. اقترح دالي أنَّ فرصة التأثير ستكون أفضل كثيرًا. وكانت المشكلة الأساسية الظاهرة في ذلك الوقت: التأثير بماذا؟ ففي تلك الأيام كان علماء الفلك والرياضيات يعتقدون أنَّ الكواكب قد تكوَّنت في مداراتها الحالية بدرجة كبيرة. غير أنه مع زيادة فعالية أجهزة الكمبيوتر، وصار من الممكن استكشاف نتائج رياضيات نيوتن في أوضاعٍ أكثرَ واقعية، أصبح واضحًا أنَّ النظام الشمسي المبكِّر استمر في التغير على نحوٍ كبير. في عام ١٩٧٥، أجرى ويليام هارتمان ودونالد دافيس حساباتٍ تقترح أنه بعد تكوُّن الكواكب، تبقَّت

بعض الأجسام الأصغر حجمًا. يمكن أن تؤسَر هذه الأجسام وتصبح أقمارًا، أو يمكن أن يتصادم بعضها مع بعض، أو مع كوكبٍ ما. وقالا إنَّ تصادمًا كهذا يمكن أن يكون هو ما شكَّل القمر، وهو تفسير يتسق مع الكثير من خصائصه المعروفة.

في عام ١٩٧٦، اقترح ألاستير كاميرون وويليام وارد أنَّ كوكبًا آخر في حجم المريخ تقريبًا، تصادم مع الأرض، وتراكمت بعض المواد التي تبعثرت منه لتكون القمر.[3] إنَّ المكونات المختلفة كانت ستتصرف على نحوٍ مختلف تحت تأثير القوى الضخمة والحرارة التي تولَّدت عن التأثير. فصخور السيليكات (على كلا الجسمين) كانت ستتبخر، لكنَّ لب الأرض الحديدي وأي لب معدني قد يمتلكه الجسم المصادِم، لن يتبخر. ومن ثمَّ، فسوف ينتهي الأمر بأن يحتوي القمر على قدرٍ من الحديد أقل مما تحتوي عليه الأرض، لكن صخور سطح القمر ودثار الأرض الذي تكثف من السيليكات المتبخرة، سيكونان شديدي الشبه في التركيب.

في ثمانينيات القرن العشرين، أجرى كاميرون وعدد من زملائه نماذج محاكاة حاسوبية لنتائج مثل هذا التأثير، وقد أوضحت أنَّ مصادِمًا في حجم المريخ — ثيا — هو أنسب ما يلائم الملاحظات.[4] بدا من المستساغ في البداية أن يتمكَّن ثيا من إخراج قطعة من دثار الأرض مع المساهمة بقدر ضئيل للغاية من مادته في الصخور التي أصبحت هي القمر. إنَّ هذا يفسِّر السبب في التشابه الشديد في تركيب هذين النوعين من الصخور. وقد كان يُعَد بالفعل تأكيدًا قويًّا لفرضية الاصطدام العملاق.

كان معظم علماء الفلك يقبلون بهذه الفكرة حتى بضع سنوات سابقة. اصطدم ثيا بالأرض البدائية في وقتٍ مبكر للغاية (في السياق الكوني) بعد تكوُّن النظام الشمسي، قبل فترة تتراوح بين ٤٫٥ مليارات عام، و٤٫٤٥ مليارات عام. لم يتصادم العالَمان تصادمًا رأسيًّا؛ بل بزاوية قدرها ٤٥ درجة. كان التصادم بطيئًا بعض الشيء (نؤكد مرة أخرى أنَّ ذلك في السياق الكوني): بمقدار أربعة كيلومترات في الثانية تقريبًا. توضِّح الحسابات أنه إذا كان ثيا يمتلك لبًّا حديديًّا، لاتحد مع الجسم الأساسي للأرض، ولأنه أكثر كثافة من الدثار، كان سيغرق ويلتحم بلب الأرض؛ إذ يجب أن تتذكَّر أنَّ الصخور كلها كانت منصهرة في هذه المرحلة. وهذا يفسِّر السبب في أنَّ الأرض تحتوي على حديد أكثر مما يحتوي عليه القمر. خُمس دثار ثيا تقريبًا، والكثير من صخور السيليكات الموجودة في الأرض، قد طُرِح في الفضاء. نصف ذلك المقدار قد انتهى به الحال في الدوران حول الأرض، وتجمَّع لتشكيل القمر. أما النصف الآخر فقد أفلت من جاذبية الأرض ودار حول

الشمس. ظل معظمه في مدارات مشابهة لمدار الأرض؛ لذا فقد تصادمت مع الأرض أو مع القمر الحديث التكوين. إنَّ الكثير من الفُوَّهات القمرية قد تكوَّنت بفعل هذه الاصطدامات الثانوية. أما على الأرض، فقد محت التعرية وغيرها من العمليات معظم فُوَّهات الاصطدام.

لقد منح الاصطدامُ الأرض كتلةً إضافية، والكثير أيضًا من الزخم الزاوي الإضافي؛ بل الكثير جدًّا حتى إنها كانت تدور حول نفسها مرة كل خمس ساعات. وأدَّى الشكل المفلطح الذي تتخذه الأرض بانبعاجها عند القطبين، إلى بذل قوى المد والجزر التي حاذت مدار القمر مع خط استواء الأرض، وأدَّت إلى استقراره هناك.

توضِّح القياسات أنَّ قشرة القمر على الجانب البعيد عن الأرض الآن أكثرُ سمكًا. ويُفسر هذا بأنَّ بعض المواد التي تبعثرت في مدار الأرض لم تُمتَص في البداية فيما قد أصبح القمر. وبدلًا من ذلك، تجمَّع قمرٌ ثانٍ أصغر في نقطةٍ تُعرف باسم «نقطة لاجرانج»، في المدار نفسه الذي يدور فيه القمر، لكنه أبعد منه بمقدار ٦٠ درجة (انظر الفصل الخامس). بعد ١٠ ملايين عام، مع انحراف الجسمَين ببطء بعيدًا عن الأرض، أصبح هذا الموقع غير مستقر، وتصادم القمر الأصغر مع القمر الأكبر. انتشرَت مادَّتُه على الجانب البعيد من القمر، مما أدَّى إلى زيادة سمك القشرة.

لقد استخدمتُ الكلمتين «محاكاة» و«حسابات» كثيرًا، غير أنك لا تستطيع إجراءَ عمليةٍ حسابيةٍ ما لم تكن تعرف ما تريد حسابه، ولا يمكنك محاكاة شيء من خلال «وضعه على الكمبيوتر فحسب». يجب أن يقوم شخصٌ ما بإعداد العملية الحسابية بتفصيل بالغ؛ فيكتب البرنامج الذي يخبِّر الكمبيوتر بكيفية أداء العملية الحسابية. ونادرًا ما تكون هذا المهام مباشرة.

إنَّ محاكاة اصطدام كوني مشكلة حسابية مهولة. فالمادة التي ينطوي عليها الاصطدام يمكن أن تكون صلبة أو سائلة أو بخارية، وتختلف القواعد الفيزيائية التي تنطبق في كل حالة، مما يستلزم صيغًا حسابية مختلفة. تنطوي المحاكاة على أربعة أنواع من المادة على الأقل: اللب والدثار لكلٍّ من ثيا والأرض. ويمكن للصخور أيًّا كانت الحالة التي توجد عليها، أن تتشظى أو تتصادم. تسير حركة هذه الصخور وفقًا لـ «شروط الحدود الحرة»، أي أنَّ ديناميكا الموائع لا تنطبق في مكان محدَّد من مكان له جدران محددة. وبدلًا من ذلك، «يقرر» المائع مكان حده، ويتغير موقع هذا الحد مع حركة السائل. إنَّ التعامل مع الحدود الحرة أصعب كثيرًا من التعامل مع الحدود الثابتة، من الناحيتين النظرية والحسابية على حد سواء. وأخيرًا، نجد أنَّ القوة المؤثرة، هي قوى

الجاذبية؛ ومن ثمَّ فهي ليست خطية. معنى هذا أنها لا تتغير تناسبيًّا مع المسافة؛ بل تتغير وفقًا لقانون التربيع العكسي. تشتهر المعادلات غير الخطية بصعوبتها الشديدة مقارنةً بالمعادلات الخطية.

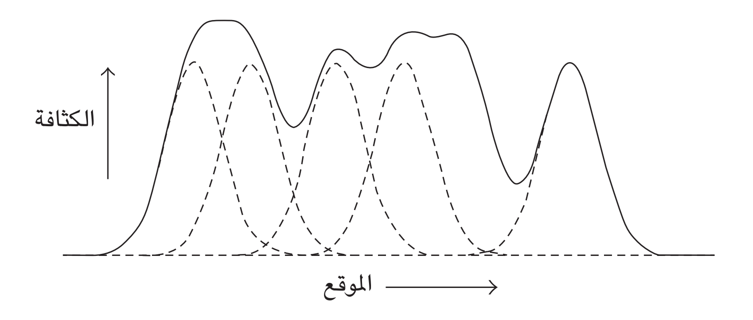
لا يمكن للطرق الرياضية التقليدية التي تستخدم الورقة والقلم أن تطمح إلى حل المسألة، ولا حتى إلى حل النسخ المبسطة منها. بدلًا من ذلك، فإنَّ أجهزة الكمبيوتر السريعة التي تمتلك قدرًا كبيرًا من الذاكرة، تستخدم الطرق العددية لتقريب المسألة، ثم إجراء الكثير من حسابات القوة الغاشمة للحصول على إجابة تقريبية. معظم نماذج المحاكاة تصمم الأجسام المتصادمة على هيئة قطرات من مائع لزج يمكن أن ينقسم إلى قطرات أصغر أو يتحد لتكوين قطرات أكبر. تكون القطرات الأولية في حجم الكواكب، وهي أصغر في الحجم بالطبع، لكنَّ ذلك مقارنة بالكواكب فقط. والسبب في هذا أنها تظل كبيرة نسبيًّا.

يعود تاريخ أحد النماذج القياسية لديناميكا الموائع إلى ليونهارد أويلر ودانييل بيرنولي في بدايات القرن الثامن عشر. وهذا النموذج يصوغ القوانين الفيزيائية لتدفُّق الموائع على صورة معادلة تفاضلية جزئية، تصف كيفية تغيُّر السرعة المتجهة للمائع في كل نقطة في الفضاء بمرور الوقت، استجابةً للقوى المؤثرة. وباستثناء حالات بسيطة للغاية، لا يمكن التوصُّل إلى الصيغ التي تحل المعادلة، لكنَّ بعض الطرق الحسابية الدقيقة قد ابتُكِرت. تتمثَّل إحدى المشكلات الأساسية في طبيعة النموذج؛ وهو ما يستلزم منا بصفة أساسية دراسة السرعة المتجهة للمائع في كل نقطة في منطقةٍ ما بالفضاء. غير أنَّ أجهزة الكمبيوتر لا تستطيع إجراء عدد لا نهائي من الحسابات؛ لذا «نقطِّع» المعادلة: نقرِّبها بمعادلة ذات صلة لا تتضمن سوى عدد محدَّد من النقاط. تستند الطريقة الأبسط إلى استخدام نقاط شبكة بصفتها عينة تمثيلية للمائع بأكمله، وتتابع تغيُّر السرعة المتجهة على نقاط الشبكة. ويُعد هذا التقريب جيدًا إذا كانت الشبكة دقيقة بالدرجة الكافية.

من سوء الحظ أنَّ هذا النهج ليس جيدًا للقطرات المتصادمة؛ لأنَّ مجال السرعة المتجهة يصبح متقطعًا حين تنفصل القطرات. ثمَّة تنويعة أخرى بارعة من طريقة الشبكة تنقذ الموقف. يمكن تطبيق هذه الطريقة حتى حين تنفصل القطرات أو تتَّحد. تُدعى هذه الطريقة باسم الديناميكا المائية للجسيمات الناعمة، وهي تقسم المائع إلى «جسيمات» متجاورة؛ أي مناطق ضئيلة للغاية. وبدلًا من استخدام شبكة ثابتة، نتتبع

الجسيمات في استجابتها للقوى المؤثرة. إذا كانت الجسيمات القريبة تتحرك بالسرعة نفسها تقريبًا وفي الاتجاه نفسه، فهذا يعني أنها في القطرة نفسها، وستظل في تلك القطرة. أما إذا كانت الجسيمات المتجاورة تتحرك في اتجاهات شديدة الاختلاف، أو تتخذ مستويات شديدة الاختلاف من السرعة المتجهة، فهذا يعني أنَّ القطرة تنفصل.

تسمح الرياضيات بنجاح هذه الطريقة من خلال «تمليس» كل جسيم إلى ما يشبه كرة وبرية ناعمة (المصطلح التقني: دالة التداخل الكروي للنواة)، ومطابقة هذه الكرات. تُحسَب حركة المائع من خلال جمع حركات هذه الكرات الوبرية. يمكن تمثيل كلٍّ من هذه الكرات بنقطتها المركزية، ويتعيَّن علينا حساب الكيفية التي تتحرك بها هذه النقاط مع مرور الوقت. يُطلق علماء الرياضيات على هذا النوع من المعادلات اسم مسألة الجسم n؛ حيث n هو عدد النقاط، أو ما يكافئه؛ أي عدد الكرات الوبرية.



تمثيل كثافة مائعٍ ما (خط متصل) على هيئة قطرات صغيرة وبرية (منحنيات متقطعة على شكل الجرس).

بالرغم من هذا كله، فمسائل الجسم n صعبة. لقد درس كيبلر مسألةً تتضمَّن جسمين، وهي مدار كوكب المريخ، واستنتج أنه على شكل القطع الناقص. وأثبت نيوتن رياضيًّا أنه حين يتحرك جسمان وفقًا لقانون التربيع العكسي للجاذبية، فكلاهما يدور في مداراتٍ على شكل القطع الناقص حول مركز كتلتهما المشتركة. غير أنَّه حين حاول الرياضيُّون في القرن الثامن عشر والتاسع عشر فَهْم مسألة الأجسام الثلاثة — تتمثَّل الحالة الأساسية منها في الشمس والأرض والقمر — اكتشفوا أنها ليست واضحةً ولا منظمة على الإطلاق. حتى صيغة ديلواني الضخمة ليست سوى تقريب. الواقع أنَّ المدارات عادةً ما تكون

فوضوية؛ أي أنها على درجة كبيرة من عدم الانتظام، وما من صيغٍ سهلةٍ أو منحنياتٍ هندسيةٍ كلاسيكيةٍ لوصفها. انظر الفصل التاسع لمعرفة المزيد عن الفوضى.

لتصميم نموذجٍ لتصادم كوكبي على نحو واقعي، لا بد أن يكون عدد الكرات الوبرية n كبيرًا للغاية؛ ألفًا بل حبذا أن يكون مليونًا. يمكن لأجهزة الكمبيوتر أن تُجري حساباتٍ بأعداد كبيرة، لكنَّ n هنا لا تمثِّل الأعداد التي تظهر في المسائل الحسابية؛ بل تقيس مدى «تعقيد» هذه العمليات الحسابية. والآن، نواجه «وبال البُعدية»؛ حيث أبعاد النظام هي عدد الأعداد التي تحتاج إليها لوصفه.

لنفترض أننا نستخدم مليون كرة. يتطلب الأمر ستة أعداد لتحديد حالة كل كرة منها: ثلاثة لإحداثياتها في الفضاء، وثلاثة لمكونات سرعتها المتجهة. ومعنى هذا أننا نحتاج إلى ستة ملايين عدد لتحديد الحالة في كل لحظة. ونحن نرغب في تطبيق قوانين الميكانيكا والجاذبية للتنبؤ بالحركة المستقبلية. وتتمثَّل هذه القوانين في معادلات تفاضلية تحدِّد الحالة في فترة ضئيلة للغاية من المستقبل، ووفقًا للحالة الراهنة. إذا كانت الخطوة الزمنية إلى المستقبل صغيرة للغاية، ثانية على سبيل المثال، فستكون النتيجة قريبة جدًّا من الحالة المستقبلية. إذن، فنحن نُجري الآن عملية حسابية بستة ملايين عدد. وعلى وجه أكثرَ تحديدًا، نُجري ستة ملايين عملية حسابية. إذن، فتعقيد العملية الحسابية هو ستة ملايين «مضروبة في» ستة ملايين؛ أي ٣٦ تريليونًا. وهذه العملية الحسابية لا تخبرنا إلا بالحالة التالية بعد ثانية في المستقبل. إذا كرَّرنا هذه العملية مرة أخرى، فإننا نعرف ما يحدث بعد ثانيتين في المستقبل، وهكذا دواليك. ولمعرفةِ ما يحدث بعد ألف عام، فإنَّنا نعالج ٣٠ مليار ثانية، وتعقيد العملية الحسابية هو ٣٠ مليارًا مضروبة في ٣٦ تريليونًا، $١٠^{٢٤}$ تقريبًا؛ أي سيبتليون واحد.

وليس ذلك أسوأ ما في الأمر. فبالرغم من أنَّ كل خطوة بمفردها قد تكون تقريبًا جيدًا، فقد أصبح لدينا الآن عدد كبير جدًّا من الخطوات حتى إنَّ أصغر الأخطاء يمكن أن ينمو، والحسابات الكبيرة تستغرق وقتًا طويلًا. إذا كان من الممكن لجهاز الكمبيوتر أن يجري خطوة واحدة في الثانية؛ أي يعمل في «الوقت الفعلي»، فإنَّ الحسابات ستستغرق ألف عام. ثم إنَّ أجهزة الكمبيوتر الفائقة وحدها هي التي يمكن أن تقترب من تحقيق ذلك. إنَّ الطريقة الوحيدة للخروج من هذا المأزق هي إيجاد طريق أبرع لإجراء الحسابات. في المراحل الأولى من الاصطدام، قد يلزم أن تكون الخطوة الزمنية في قِصر الثانية؛ لأنَّ كل شيء فوضى معقَّدة. أما لاحقًا، فقد تكون الخطوات الزمنية الأطول مقبولة. علاوةً على

ذلك، فور أن تبتعد نقطتان إحداهما عن الأخرى بالدرجة الكافية، يصبح مقدار القوة بينهما صغيرًا للغاية حتى إنه يمكن تجاهلها تمامًا. وأخيرًا، وهي الخطوة التي يأتي منها أكبر قدر من التحسُّن، يمكن تبسيط العملية الحسابية بأكملها بطريقة أبرع.

أجرت نماذج المحاكاة المبكرة للغاية خطوةً تبسيطية إضافية. فبدلًا من إجراء الحسابات في فضاء ثلاثي الأبعاد، اختصرت المسألة إلى بُعدين بافتراض أنَّ كل شيء يحدث في مستوى مدار الأرض. والآن، يتصادم جسمان دائريان لا جسمان كرويان. يوفِّر هذا التبسيط ميزتين. أولاهما أنَّ الستة ملايين تصبح أربعة ملايين (أربعة أعداد لكل كرة وبرية). والأفضل من ذلك، أننا لم نَعُد نحتاج إلى مليون كرة، ربما تكفي ١٠٠٠٠ كرة. والآن، يصبح لدينا ٤٠٠٠٠ كرة بدلًا من ستة ملايين، ويقل التعقيد من ٣٦ تريليونًا إلى ١٫٦ مليار.

ثمَّة شيء آخر أيضًا …

لا يكفي أن نقوم بإجراء الحسابات مرة واحدة. فنحن لا نعرف كتلة الجسم المصادِم ولا سرعته ولا الاتجاه الذي يأتي منه عند الاصطدام. وكل خيار يستلزم عملية حسابية جديدة. كان ذلك من القيود التي واجهتها الأعمال المبكرة لأنَّ أجهزة الكمبيوتر كانت أبطأ. وكان قضاء الوقت على أجهزة الكمبيوتر الفائقة باهظًا أيضًا؛ لذا فلم يكن يُسمَح للمنح البحثية إلا بعدد صغير من المرات. ونتيجةً لهذا، كان على الباحث أن يقوم بعدد من التخمينات الجيدة من البداية، وذلك بناءً على بعض الاعتبارات الأساسية مثل «هل يمكن لهذا الافتراض أن ينتج المقدار النهائي الصحيح للزخم الزاوي؟» بعد ذلك، لا يتبقى سوى أن تتحلَّى بالأمل.

تمكَّن الرواد من التغلب على هذه العقبات. لقد توصَّلوا إلى تصوُّر ناجح. وحسَّنته الأعمال اللاحقة. لم يَعد أصل القمر لغزًا.

هل تحقَّق ذلك فعلًا؟

إنَّ تصميم محاكاة لنظرية الاصطدام العملاق لتكوُّن القمر يتضمن مرحلتين أساسيتين: الاصطدام نفسه، وتكوين قرص من الغبار، وما تلا ذلك من تراكم لجزء من ذلك القرص لتكوين قطعة متماسكة؛ القمر الوليد. حتى العام ١٩٩٦، حصر الباحثون حساباتهم على المرحلة الأولى، وكانت طريقتهم الأساسية هي الديناميكا المائية للجسيمات الملساء. وقد كتب[5] روبين كانوب وإريك أسباوج في عام ٢٠٠١ أنَّ هذه الطريقة

«تلائم الأنظمة الشديدة التشوه التي تتطوَّر في فضاء فارغ في معظمه»، وهو ما نحتاج إليه تحديدًا في هذه المرحلة من المسألة.

ولأنَّ نماذج المحاكاة كبيرة وصعبة، اكتفى الباحثون بالتوصُّل إلى ما حدث بعد الاصطدام مباشرة. تتوقَّف النتائج على العديد من العوامل: كتلة الجسم المصادِم وسرعته، والزاوية التي يصطدم بها مع الأرض، والسرعة الدورانية للأرض، والتي كانت قبل العديد من مليارات الأعوام مختلفة عمَّا هي عليه اليوم على الأرجح. إنَّ هذه القيود العملية على حسابات الجسم n، كانت تعني مبدئيًّا أنَّ العديد من الخيارات لم تُستكشف. فمن أجل إبقاء الحسابات ضمن حدود الممكن، كانت النماذج الأولى ثنائية الأبعاد. بعد ذلك، صارت المهمة هي البحث عن الحالات التي أخرج فيها الجسم المصادِم قدرًا كبيرًا من مادة دثار الأرض إلى الفضاء. كان المثال الأكثر إقناعًا هو وجود جسم مصادِم في حجم المريخ؛ فصار هذا التصوُّر هو المنافس الرئيس.

كانت جميع هذه النماذج لمحاكاة الاصطدام العملاق تنطوي على سمة واحدة مشتركة فيما بينها، وهي أن الاصطدام قد شكَّل قرصًا ضخمًا من الغبار يدور بالأرض. عادةً ما كانت نماذج المحاكاة تصمم ديناميكيات هذا القرص لبضعة مدارات فقط، وهو ما يكفي لتوضيح أنَّ الكثير من الغبار قد ظل في المدار ولم يصطدم وهو يتقهقر مرة أخرى ولم يندفع أيضًا إلى الفضاء الخارجي. لقد «افترض» العلماء أنَّ العديد من الجسيمات الموجودة في قرص الغبار كانت ستتراكم في نهاية المطاف لتكوين جسم كبير، وأنَّ هذا الجسم هو ما سيصبح القمر، لكنَّ أحدًا لم يتحقَّق من هذا الافتراض لأنَّ تتبُّع الجسيمات إلى درجةٍ أبعدَ يكون باهظًا للغاية وسيستغرق الكثير من الوقت.

افترضت بعض الأعمال اللاحقة افتراضًا ضمنيًّا مفاده أنَّ المعلمات الأساسية، مثل كتلة الجسم المصادِم وما إلى ذلك، قد سُويت في هذا العمل الريادي بالفعل، وركَّزت على حساب تفاصيل إضافية بدلًا من حساب معلمات بديلة. صار هذا العمل الريادي ضربًا من العقيدة الأرثوذكسية، ولم تَعُد بعض افتراضاته تُطرح للتساؤل. بدت أول علامة على وجود المشكلات مبكرًا. فالتصورات الوحيدة التي تلاءمت منطقيًّا مع الملاحظات، كانت تستلزم من المصادِم أن يخدش الأرض لا أن يصطدم بها مباشرة؛ لذا فمن غير الممكن أنه كان موجودًا في مستوى المدار الأرضي. إذن، فالنموذج الثنائي الأبعاد ليس بكافٍ، ولا بد من وجود محاكاة كاملة ثلاثية الأبعاد لتحقيق المهمة. من حسن الحظ أنَّ قوى أجهزة الكمبيوتر الفائقة تتطور بسرعة، ومع وجودِ ما يكفي من الوقت والنفقات، صار من الممكن تحليل التصادمات في نماذج ثلاثية الأبعاد.

غير أنَّ معظم نماذج المحاكاة المحسَّنة هذه أوضحت أنَّ القمر يجب أن يحتوي على قدرٍ كبير من صخور «الجسم المصادِم»، وقدرٍ أقل منه كثيرًا من صخور دثار الأرض. ومن ثمَّ، فقد صار التفسيرُ البسيطُ الأصلي المتمثِّلُ في وجود تشابهٍ بين صخور القمر وصخور دثار الأرض؛ أقلَّ إقناعًا بدرجة كبيرة؛ بدا أنه يستلزم أن يكون دثار ثيا شديدَ الشبه على نحوٍ مذهل بدثار الأرض. بالرغم من هذا، رأى بعض علماء الفلك أنَّ هذا هو ما حدث حتمًا، غافلين بذلك عن أنَّ التشابُه بين الأرض والقمر من الألغاز التي كان يُفترَض بالنظرية تفسيرها. إذا لم تكن مقبولةً في حالة القمر، فلماذا تُقبَل في حالة ثيا؟

ثمَّة إجابة جزئية: ربما تكوَّن كلٌّ من ثيا والأرض على المسافة نفسها من الشمس في الأصل. والاعتراضات التي ظهرت قبل ذلك في حالة القمر لا تنطبق في هذه المرة. فما من مشكلةٍ مع الزخم الزاوي لأننا لا نعرف على الإطلاق ما فعلَتْه بقية قطع ثيا بعد الاصطدام. ومن المنطقي أن نفترض أنَّ الأجسام التي تكوَّنت في مواقع متشابهةٍ في السديم الشمسي؛ تتشابه في تركيباتها. غير أنه لا يزال من الصعب تفسيرُ السبب في بقاء ثيا والأرض جسمَين منفصلَين لفترةٍ طويلةٍ بالدرجة التي تكفي لأن يُصبحا كوكبَين مستقلَّين، لكنهما يصطدمان بعد ذلك. ليس ذلك محالًا، لكنه لا يبدو مرجحًا.

ثمَّة نظرية مختلفة تبدو أكثر منطقية؛ لأنها لا تطرح أية افتراضاتٍ بشأن تركيب ثيا. لنفترض أنَّ صخور السيليكات قد امتزجت تمامًا معًا بعد أن تبخَّرت وقبل أن تبدأ في التجمُّع. بعد ذلك، سيكون الأرض والقمر كلاهما قد حظيا بمساهماتٍ من صخورٍ شديدة التشابه. تشير الحسابات إلى أنَّ هذه الفكرة لا تنجح إلا إذا كان البخار قد ظل موجودًا على مدار قرن، مكوِّنًا ما يشبه غلافًا جويًّا قد امتد ليغطي المدار المشترك لثيا والأرض. تُجرى الدراسات الرياضية لتحديدِ ما إذا كانت هذه النظرية ممكنةً من الناحية الديناميكية أم لا.

بالرغم من ذلك، فإنَّ الفكرة الأصلية المتمثلة في أنَّ الجسم المصادِم قد طرح قطعة من دثار الأرض في الفضاء، لكنه هو نفسه لم يساهم كثيرًا في تكوين ما سيصبح القمر؛ تظل أكثرَ إقناعًا. ولهذا، بحث علماء الفلك عن بدائل تتضمن حدوث تصادم، لكنها تستند إلى افتراضات مختلفة تمامًا. ففي عام ٢٠١٢، حلل أندريا رويفر وزملاؤه نتائج مصادِم سريع الحركة أكبر كثيرًا من المريخ يمر بجانب الأرض بدلًا من أن يصطدم بها رأسيًّا.[6] وقد اتضح أنَّ قدرًا ضئيلًا من المادة المبعثرة يأتي من المصادم، وحسابات الزخم الزاوي ملائمة، واتضح أيضًا أنَّ تركيب القمر والدثار أكثر تشابهًا مما كان يُعتقد من قبل.

ووفقًا لتحليلٍ جديدٍ أجراه فريق جونجون تشانج للمادة القمرية التي أحضرتها بعثة «أبولو»، كانت نسبة النظيرين تيتانيوم ٥٠ وتيتانيوم ٤٧، مساويةً للنسبة الموجودة في الأرض حتى أربعة أجزاء في المليون.[7]

ثمَّة احتمالات أخرى قد دُرِست أيضًا. فقد أوضح ماتيا تشوك وزملاؤه أنَّ التركيب الكيميائي الصحيح لصخور القمر والزخم الزاوي الإجمالي كان يمكن أن ينشأ من اصطدام مع مصادِم أصغر، إذا كانت الأرض تدور بسرعة أكبر كثيرًا من تلك التي تدور بها اليوم. فالدوران يغيِّر كمية الصخور التي تتبعثر والجسم الذي تأتي منه. بعد التصادم، قد تكون قوى الجاذبية من الشمس والقمر أبطأت من سرعة دوران الأرض. ومن ناحية أخرى، وجد كانوب نماذج محاكاة مقنعة لم تكن الأرض تدور فيها إلا بسرعة أكبر قليلًا من تلك التي تدور بها اليوم، بافتراض أنَّ المصادِم أكبر من المريخ بدرجة ملحوظة. أو ربما تصادم جسمان يبلغ حجمهما خمسة أضعاف حجم المريخ، ثم تصادما من جديد، مشكِّلين قرصًا كبيرًا من الغبار كوَّن في نهاية المطاف كلًّا من الأرض والقمر. أو …

أو ربما تكون نظرية المصادِم صحيحة، وأنَّ تركيب ثيا كان شديد الشبه بتركيب الأرض بالفعل، وأنها لم تكن مصادفة على الإطلاق.

في ٢٠٠٤، أوضح كانوب[8] أنَّ النوع الأكثر منطقية لثيا أن تكون كتلته سُدس كتلة الأرض، وأن تكون أربعة أخماس من مادة القمر الناتجة قد أتت من ثيا. ينطوي ذلك على أنَّ التركيب الكيميائي لثيا كان قريبًا ولا بد من تركيب الأرض، بالدرجة نفسها التي يتشابه بها تركيب القمر وتركيب الأرض. يبدو ذلك غير محتمل على الإطلاق: ذلك أن أجسام النظام الشمسي يختلف بعضها عن بعض بدرجة ملحوظة؛ فما المختلف بشأن ثيا؟ من الإجابات المحتملة كما رأينا سابقًا، أنَّ الأرض وثيا قد تكوَّنا في ظروف متشابهة، على المسافة نفسها من الشمس؛ لذا فقد اكتسح كلاهما المواد نفسها. ثم إنَّ وجودهما في المدار نفسه تقريبًا يزيد من فرصة التصادم.

من جانب آخر، هل يمكن لجسمين كبيرين أن يتكوَّنا في المدار نفسه؟ ألن يفوز أحدهما باكتساح معظم المادة المتاحة؟ يمكنك أن تتجادل بشأن ذلك إلى الأبد … أو يمكنك أن تُجري الحسابات. في عام ٢٠١٥، استخدمت أليندرا مستروبونو-باتيستي وزملاؤها طرق الجسم n لإجراء ٤٠ نموذج محاكاة للمراحل المتأخرة في التراكم الكوكبي.[9] بحلول

ذلك الوقت، كان المشتري وزحل كاملَي التكوين؛ إذ ابتلعا معظم الغاز والغبار، وكانت الجسيمات الكوكبية و«الأجنة الكوكبية» الأكبر تتجمَّع معًا لتشكيل الأجسام الكبيرة جدًّا. بدأت كل دورة بما يقرب من ٨٥–٩٠ من الأجنة الكوكبية ومن ١٠٠٠–٢٠٠٠ من الجسيمات الكوكبية التي تقع في قرصٍ يمتد إلى ما بين ٠٫٥–٤٫٥ وحدات فلكية. كان مدارا المشتري وزحل يميلان بشكل طفيف، واختلفت درجات الميل بين الدورات.

في معظم الدورات، تكوَّنت ثلاثة أو أربعة من الكواكب الصخرية الداخلية في نطاق فترة تتراوح بين ١٠٠–٢٠٠ مليون عام، بينما اتحدَّت الأجنة والجسيمات الكوكبية. تتبعت نماذج المحاكاة منطقة التغذية في كل عالَم من العوالم؛ أي المنطقة التي ابتلع الكوكب منها مكوِّناته. وبافتراض أنَّ التركيب الكيميائي للقرص الشمسي يتوقف بصفة أساسية على المسافة من الشمس؛ ومن ثمَّ يكون التركيب الكيميائي للأجسام التي تقع في مدارات تبعد المسافة نفسها عن الشمس متشابهًا بدرجة كبيرة، نستطيع مقارنة التركيبات الكيميائية للأجسام المتصادِمة. ركَّز الفريق على مدى التشابه بين كلٍّ من الكواكب الثلاثة المتبقية أو الأربعة، وبين أحدث الأجسام التي اصطدمت به. يؤدي الرجوع بالمحاكاة إلى مناطق تغذية هذه الأجسام إلى توزيعات الاحتمالات بشأن تركيبِ كلٍّ من هذه الأجسام. بعد ذلك، تحدِّد الطرق الإحصائية مدى تشابه هذه التوزيعات. يكون التركيب الكيميائي لكلٍّ من المصادم والكوكب متشابهًا بدرجةٍ كبيرة في سُدس نماذج المحاكاة. ومع مراعاة احتمالية أن يمتزج أحد الكواكب الأولية أيضًا في القمر، فإنَّ هذه النسبة تتضاعف إلى الثلث تقريبًا. ومعنى هذا باختصارٍ أنه يوجد «احتمال واحد من بين ثلاثة احتمالات» بأنَّ التركيب الكيميائي لثيا كان هو نفسه التركيب الكيميائي للأرض. إنَّ هذا منطقي تمامًا؛ لذا فبالرغم من المخاوف السابقة، نجد أنَّ تشابه التركيب الكيميائي بين صخور القمر ودثار الأرض، متسقٌ في حقيقة الأمر مع التصوُّر الأصلي المتمثل في الاصطدام العملاق.

لدينا الآن وفرة من النظريات: العديد من نظريات الاصطدام العملاق المختلفة، وكلها تتفق مع الآلة الأساسية. لا يزال علينا أن ننتظر كي نعرف أي من هذه النظريات صحيح؛ إذا كان بها نظرية صحيحة أصلًا. بالرغم من ذلك، فلكي يكون التركيب الكيميائي والزخم الزاوي كلاهما صحيح، يبدو أنَّ وجود مصادم كبير أمرٌ لا مفر منه.

الفصل الرابع

كون الساعة الآلية

«لكن أكان على «السيد العقل المدبِّر» أن يترك الفضاء فارغًا؟ كلَّا على الإطلاق.»

يوهان تيتيوس في كتاب «تأمُّلات في الطبيعة»
بقلم تشارلز بونيه

أرسى كتاب «الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية» الذي ألَّفه نيوتن، قيمة الرياضيات بوصفها أداة لفهم الكون. وأدى الكتاب إلى صكِّ مفهوم كون الساعة الآلي المثير للاهتمام، والذي يقضي بأنَّ الشمس والكواكب قد خُلِقت على هيئتها الحالية. وظلت الكواكب تدور حول الشمس في مدارات دائرية تقريبًا، بينما يبعُد بعضها عن بعض مسافات متساوية كي لا يصطدم أحدها بالآخر؛ بل إنها حتى لم تقترب من ذلك. وبالرغم من أنَّ كل شيء كان يتذبذب نوعًا ما بسبب جاذبية كل كوكب التي تشد جميع الكواكب الأخرى، فلم يتغير أيُّ شيء مهم. لقد تجسَّدت هذه الرؤية في آلة ظريفة تُعرف باسم المبيان؛ آلة مكتبية توجد بها كواكب ضئيلة موضوعة على عصي وتدور حول الشمس المركزية، وتسيِّرها عجلة مسنَّنة. كانت الطبيعة مبيانًا ضخمًا، والجاذبية هي العجلة التي تحرِّكه.

كان علماء الفلك الذين يتمتعون بعقلية رياضية يعرفون أنَّ الأمر ليس بتلك الدرجة من البساطة. فالمدارات لا تتخذ شكل دوائر دقيقة؛ بل إنها حتى لا تقع في المستوى نفسه، وبعض ذبذباتها بارزة إلى حد كبير. يتجلى ذلك تحديدًا في أكبر كوكبين في النظام الشمسي؛ المشتري وزحل، المنخرطين في صراع تجاذبي طويل المدى؛ إذ يشد أحدهما الآخر أمام موقعيهما المعتادين في مداراتهما أولًا، ثم يشدان بعضهما بعضًا خلفه، وهما

يفعلان ذلك مرارًا وتكرارًا. فسَّر لابلاس هذا الأمر عام ١٧٨٥ تقريبًا. يتمثَّل تفسيره في وجود رنين مداري بين العملاقين تبلغ نسبته ٥:٢؛ إذ يدور المشتري حول الشمس خمس مرات، بينما يدور زحل حولها مرتين فقط. وعند قياس موقعيهما في المدار بالزوايا، يتضح أنَّ الفرق قريب من الصفر، لكنه ليس صفرًا بالضبط، مثلما شرح لابلاس. وإنما يتغير ببطء ليكمل دورة كاملة كل ٩٠٠ عام. وصار هذا التأثير معروفًا باسم «التباين العظيم».

٢ × زاوية للمشتري – ٥ × زاوية لزحل.

أثبت لابلاس أنَّ التفاعل لا ينتج تغييرات كبيرة في الانحراف المركزي لمدار أيٍّ من الكوكبين أو ميله. وأدَّت نتيجةٌ من هذا النوع إلى وجود شعور عام بأنَّ الترتيب الحالي للكواكب مستقر. أي أنه سيظل على الحالة نفسها تقريبًا في المستقبل، مثلما كان على هذه الحالة دائمًا في الماضي.

غير أنَّ الأمر ليس كذلك. فكلما عرفنا المزيد عن النظام الشمسي، قلَّ الشبه بينه وبين الساعة، وزاد الشبه بينه وبين تركيبٍ عجيبٍ يتصرَّف على نحوٍ جيد في «معظم» الأوقات، لكنه يُجن تمامًا في بعض الأحيان. من اللافت للنظر أنَّ هذه الالتفافات الغريبة لا تشكِّك في قانون نيوتن للجاذبية؛ بل هي «نتائجه». فالقانون نفسه أنيق ومنطقي من الجانب الرياضي، إنه البساطة نفسها. غير أنَّ نتائجه ليست كذلك.

لفهم أصول النظام الشمسي، لا بد من تفسير كيفية ظهوره وكيفية ترتيب أجسامه المتعددة الأنواع. للوهلة الأولى، تبدو هذه الأجسام متمايزة للغاية؛ فكل عالَم منها فريد من نوعه، وتزيد الاختلافات فيها عن التشابهات. فعطارد صخرة ساخنة تدور ثلاث مرات من الدوران الذاتي مقابل كل مرتين من الدوران المداري، تبلغ نسبة الرنين بين الدوران الذاتي والدوران المداري ٣:٢. والزهرة جحيم حامضي عُدِّل سطحه بالكامل قبل بضع مئات من ملايين الأعوام. وتمتلك الأرض المحيطات والأكسجين والحياة. والمريخ صحراء باردة توجد بها فُوَّهات ووديان. أما المشتري فهو كرة عملاقة من الغازات الملوَّنة التي تشكِّل خطوطًا زخرفية. يُعد زحل مشابهًا له بدرجة أقل وضوحًا، لكنه يمتلك حلقات رائعة بدلًا من ذلك. أما أورانوس فهو عملاق جليدي هادئ، وهو يدور في الاتجاه الخاطئ. ثمَّة عملاق جليدي آخر هو نبتون الذي تحيط به رياح تزيد سرعتها عن ٢٠٠٠ كيلومتر في الساعة.

بالرغم من ذلك، توجد أيضًا إشارات محيرة تدل على النظام. فالمسافات المدارية للكواكب الستة الكلاسيكية هي كما يلي بالوحدات الفلكية:

عطارد	٠٫٣٩
الزهرة	٠٫٧٢
الأرض	١٫٠٠
المريخ	١٫٥٢
المشتري	٥٫٢٠
زحل	٩٫٥٤

صحيح أنَّ الأعداد غير منتظمة بعض الشيء، ومن الصعب أن تجد فيها نمطًا للوهلة الأولى حتى إن خطرَ لك البحث عنه. بالرغم من ذلك، فقد اكتشف يوهان تيتيوس في هذه الأعداد عام ١٧٦٦ شيئًا مثيرًا للاهتمام، ووصفه في ترجمته لكتاب تشارلز بونيه «تأملات في الطبيعة»:

> إذا قسَّمت المسافة من الشمس إلى زحل إلى ١٠٠ جزء، فستجد أنَّ عطارد يبعد عن الشمس بمقدار أربعة من هذه الأجزاء، ويبعد الزهرة عن الشمس بمقدار ٤ + ٣ = ٧ أجزاء، ويبعد كوكب الأرض بمقدار ٤ + ٦ = ١٠، ويبعد المريخ بمقدار ٤ + ١٢ = ١٦. لكن لاحظ أنَّ المسافة من المريخ إلى المشتري تشهد انحرافًا عن ذلك التقدُّم الدقيق. تأتي بعد المريخ مساحة ٤ + ٢٤ = ٢٨ من هذه الأجزاء، لكننا لم نكتشف كوكبًا هناك حتى الآن ... وبجوار هذا الفضاء الذي لم نستكشفه بعد، تظهر كرة المشتري على مسافة ٤ + ٤٨ = ٥٢ جزءًا، ثم يأتي زحل على مسافة ٤ + ٩٦ = ١٠٠ جزء.

ذكر يوهان بوديه النمط العددي نفسه عام ١٧٧٢ في كتابه «دليل لمعرفة السماء المرصَّعة بالنجوم»، وفي النسخ التالية نسب الفضل فيه إلى تيتيوس. بالرغم من ذلك، فهو يُسمى غالبًا بقانون بوديه. ثمَّة مصطلح أفضل يُستخدم لوصف القانون في الاستخدام العام، وهو قانون تيتيوس–بوديه.

إنَّ هذا القانون التجريبي المحض، يربط المسافات بين الكواكب بتسلسل هندسي (على نحو تقريبي). بدأت الصيغة الأصلية منه بالتسلسل: ٠، ٣، ٦، ١٢، ٢٤، ٤٨، ٩٦،

١٩٢، والذي يكون فيه كل عدد بعد الثاني، ضعف العدد السابق عليه، وبعد إضافة ٤ لها جميعًا نحصل على: ٤، ٧، ١٠، ١٦، ٢٨، ٥٢، ١٠٠. بالرغم من ذلك، يظل من المفيد أن نصف هذه الأعداد بالوحدات الحالية للقياس، وهي الوحدة الفلكية، من خلال قسمتها جميعًا على ١٠؛ فنحصل على: ٠٫٤، ٠٫٧، ١٫٠، ١٫٦، ٢٫٨، ٥٫٢، ١٠٫٠. إنَّ هذه الأعداد تتلاءم على نحوٍ مذهل مع المسافات بين الكواكب، باستثناء الثغرة التي تناظر ٢٫٨. كان تيتيوس يعتقد أنه يعرف ما يوجد ولا بد في تلك الثغرة. فقد ورد في الجزء الذي استبدلت به علامة الحذف (…) من ملاحظته ما يلي:

> لكن هل كان السيد المهندس ليترك الفضاء فارغًا؟ كلَّا على الإطلاق. لنفترض إذن أنَّ هذا المكان يعود من دون شك إلى أقمار المريخ التي لم تُكتشف بعد، ولنفترض أيضًا أنَّ المشتري ربما لا تزال تحيط به بعض الأقمار الأصغر التي لم ترصدها أية تلسكوبات بعد.

نحن ندرك الآن أنَّ أقمار المريخ ستوجد بالقرب من المريخ، وينطبق الأمر نفسه على المشتري، أخطأ تيتيوس في تحديد المكان قليلًا، لكنَّ اقتراح أنَّ «جسمًا» ما لا بد أن يشغل الفجوة كان صائبًا تمامًا. بالرغم من ذلك، فلم يتناوله أحد بجدية إلا بعد اكتشاف أورانوس عام ١٧٨١، وكان يلائم النمط أيضًا. فالمسافة التي تنبَّأ بها القانون هي ١٩٫٦، والمسافة الفعلية هي ١٩٫٢.

تشجَّع علماء الفلك جراء هذا النجاح وبدءوا يبحثون عن كوكبٍ غير مرصود يدور حول الشمس على مسافة تبلغ ٢٫٨ ضعف نصف قطر مدار الأرض. وفي عام ١٨٠١، اكتشف جيوسبه بياتسي واحدًا، ومن المفارقات أنه اكتشفه قبيل بدء مشروع البحث المنهجي للتو. أُطلِق على هذا الجِرم المكتشَف اسم سيريس، وسنتناول قصته في الفصل الخامس. كان أصغر من المريخ وأصغر كثيرًا من المشتري، لكنه كان «موجودًا».

وللتعويض عن حجمه الضئيل، لم يكن وحيدًا. فسرعان ما اكتُشِفت ثلاثة أجسام أخرى هي بالاس وجونو وفيستا، تقع على مسافات متشابهة. كانت هذه الأجسام هي الكويكبات الأربعة الأولى، أو الكواكب الثانوية الأولى، لكنها سرعان ما تُبِعت بالكثير. مائتان منها تقريبًا لا يزيد قطرها عن كيلومتر واحد، وثمَّة ما لا يقل عن ١٥٠ مليونًا قد اكتُشِفت لا يزيد قطرها عن ١٠٠ متر، ومن المتوقع أن يوجد منها الكثير جدًّا مما هو أصغر حجمًا. تشتهر هذه الأجسام بتكوينها لحزام الكويكبات، وهو منطقة حلقية مسطحة تقع بين مدارَي المريخ والمشتري.

ثمَّة أجسامٌ صغيرةٌ أخرى توجد في أرجاء النظام الشمسي، لكنَّ العدد القليل الذي اكتُشِف منها في البداية هو ما أضاف قيمةً لرأي بوديه بأنَّ الكواكب موزعةٌ على نحوٍ منتظم. صحيح أنَّ ما حفَّز الاكتشاف اللاحق لكوكب نبتون هو وجود تفاوتاتٍ في مدار أورانوس، لا قانون تيتيوس-بوديه. غير أنَّ القانون قد تنبَّأ بمسافةٍ تبلغ ٣٨٫٨، وهي قريبةٌ إلى حدٍّ كبير من المسافة الفعلية التي تتراوح بين ٢٩٫٨ و٣٠٫٣. وبالرغم من أنَّ درجة التلاؤم أضعف، فهي لا تزال مقبولة. أتى بعد ذلك بلوتو: المسافة النظرية هي ٧٧٫٢، بينما تتراوَح المسافة الفعلية بين ٢٩٫٧ و٤٨٫٩. وأخيرًا، انهار «قانون» «تيتيوس-بوديه».

انهارت أيضًا بعض السمات النمطية الأخرى لمدارات الكواكب. بلوتو على سبيل المثال غريب للغاية. ذلك أنَّ مداره على درجة عالية من الانحراف المركزي، ويميل بعيدًا عن مدار الشمس بمقدار كبير يبلغ ١٧ درجة. بل إنَّ بلوتو «يدخل» أحيانًا في مدار نبتون. أدت سمات غريبة مثل هذه إلى إعادة تصنيف بلوتو بصفته كوكبًا قزمًا. وكتعويضٍ جزئي، أصبح سيريس أيضًا كوكبًا قزمًا، لا محض كُوَيكب (أو كوكب ثانوي).

وبالرغم من مزيج النجاح والفشل الذي واجه قانون تيتيوس-بوديه، فإنه يطرح سؤالًا مهمًّا. أيوجد تبرير رياضي للمسافات التي تتوزَّع عليها الكواكب؟ أم أنها يمكن أن تتوزَّع بصفة مبدئية بأي طريقة مرغوبة؟ هل القانون محض صدفة، أم أنه علامة على وجود نمط أساسي، أم هو مزيج من الاثنين؟

تتمثَّل الخطوة الأولى في إعادة صياغة قانون تيتيوس-بوديه بطريقة عمومية ومعدَّلة بعض الشيء. فالصيغة الأصلية منه تنطوي على حالة من الشذوذ، وهي استخدام العدد ٠ في الحد الأول. ولكي يكون التسلسل الهندسي صحيحًا، لا بد أن يكون هذا الحد ١٫٥. وبالرغم من أنَّ هذا الاختيار يجعل مسافة عطارد ٠٫٥٥، وذلك أقل دقة، فإنَّ العملية كلها تجريبية وتقريبية؛ لذا فالأكثر منطقية هو الحفاظ على صحة الرياضيات واستخدام ١٫٥. والآن يمكننا التعبير عن القانون في صيغة بسيطة: المسافة من الشمس إلى أحد الكواكب أيًّا كان ترتيبه بالوحدات الفلكية هي:

$$d = 0.075 \times 2^n + 0.4$$

والآن، علينا إجراء بعض العمليات الحسابية. في الصورة الكبرى للكون، لا يمثِّل مقدار ٠٫٤ وحدة فلكية فرقًا كبيرًا بالنسبة للكواكب الأبعد؛ لذا نحذفه لنحصل على

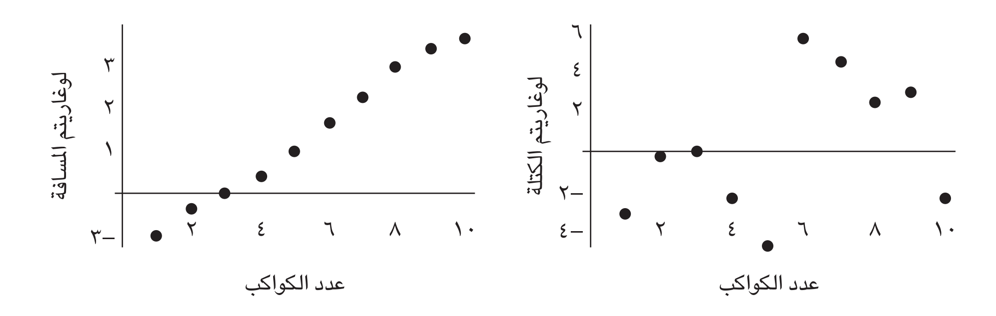
$d = 0.075 \times 2^n$. تُعد هذه الصيغة مثالًا على صيغة القانون الأسي الذي يأتي عمومًا على الصورة: $d = ab^n$، حيث a وb ثابتان.

نحسب اللوغاريتمات:

$$\log d = \log a + n \log b$$

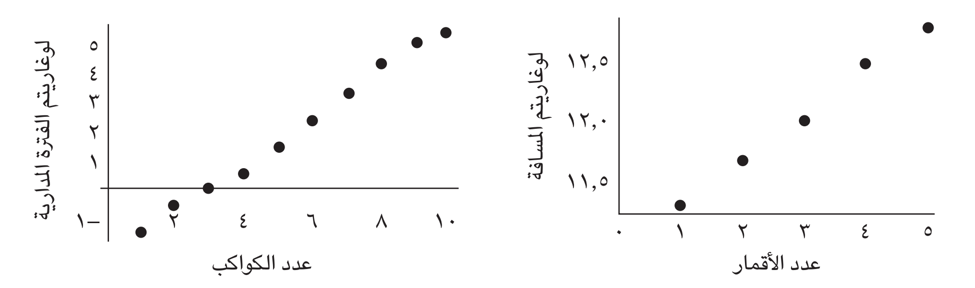
باستخدام n ولو d كإحداثيات، نجد أنَّ هذه الصيغة تعبِّر عن خط مستقيم بمنحنى لو b، ويلتقي بالمحور الرأسي عند لو a. والطريقة التي يمكن بها تحديد قانون أسي هي إجراء «مخطط رسم لوغاريتمي/لوغاريتمي» للوغاريتم d مقابل n. إذا كانت النتيجة قريبة من خط مستقيم، يفلح الأمر. ويمكننا بالطبع تطبيق الأمر نفسه على كميات أخرى غير المسافة d، مثل فترة الدوران حول النجم أو الكتلة على سبيل المثال.

إذا طبقنا هذا على مسافات الكواكب بما في ذلك سيريس وبلوتو، فسنحصل على الشكل الموجود على اليسار. إنه لا يختلف كثيرًا عن الخط المستقيم مثلما نتوقَّع من قانون تيتيوس-بوديه. فماذا عن الكتل الموضحة في الشكل الموجود على اليمين؟ في هذه المرة، نجد أنَّ مخطط الرسم اللوغاريتمي/اللوغاريتمي مختلفٌ جدًّا. فما من أثر لأي خط مستقيم، أو حتى أي نمط واضح.



على اليسار: مخطط الرسم اللوغاريتمي/اللوغاريتمي لمسافات الكواكب يشبه الخط المستقيم.
على اليمين: مخطط الرسم اللوغاريتمي/اللوغاريتمي لكتل الكواكب لا يشبه الخط المستقيم.

ماذا عن الفترات المدارية؟ خط مستقيم من جديد: انظر الشكل الموجود على اليسار. غير أنه لا عجب في ذلك؛ لأنَّ قانون كيبلر الثالث يربط الفترة بالمسافة على نحوٍ يحفظ



على اليسار: مخطط الرسم اللوغاريتمي/اللوغاريتمي لفترات الكواكب يشبه الخط المستقيم.
على اليمين: مخطط الرسم اللوغاريتمي/اللوغاريتمي لمسافات أقمار أورانوس يشبه الخط المستقيم.

علاقات القانون الأسي. نبحث على نطاق أكبر فنتجه إلى دراسة أقمار أورانوس الخمسة، ونحصل على الشكل الموجود على اليمين. القانون الأسي مجددًا.

أهي المصادفة أم شيء أعمق؟ ينقسم علماء الفلك في الرأي بشأن ذلك. يبدو على الأرجح أنَّه توجد «نزعة» لتوزيعات المسافات وفقًا لقانون أسي. وهي ليست شاملة.

ربما يوجد تفسير عقلاني لذلك. ويبدأ التفسير الأرجح من الفكرة القائلة بأنَّ ديناميكيات نظام عشوائي من الكواكب تعتمد اعتمادًا أساسيًّا على حالات الرنين؛ أي تلك الحالات التي تُمثَّل فيها العلاقة بين الفترتين المداريتين لكوكبين بكسر بسيط. فعلى سبيل المثال، يمكن أن تبلغ إحدى الفترتين مقدار ٣/٥ من الأخرى، فيكون الرنين بينهما ٥:٣.[1] ومع إغفال جميع الأجرام الأخرى، سيظل هذان الكوكبان يصطفان أحدهما مع الآخر على خط نصف القطر المنبثق من النجم، على فترات زمنية منتظمة لأنَّ خمس دورات لأحدهما تتطابق تمامًا مع ثلاث دورات للآخر. على مدار فترات طويلة من الزمن، ستتراكم الاضطرابات الصغيرة؛ لذا غالبًا ما يغيِّر الكوكبان مداريهما. أما حين تكون النسب بين الفترات لا تُمثَّل بكسور صحيحة، فإنَّ تأثير الاضطرابات يُلغى في معظم الأحيان بسبب عدم وجود اتجاه سائد لقوة الجاذبية المؤثرة بين العالمين.

ليس ذلك اقتراحًا مبهمًا فحسب؛ بل تؤيده الحسابات المفصَّلة وجزء شاسع من النظرية الرياضية. للحصول على نتيجة تقريبية أولى، يكون مدار الجرم السماوي على شكل القطع الناقص. في المستوى التالي من التقريب، يتقدم القطع الناقص: يدور محوره الأساسي ببطء.

وللتقريب بدرجة أكبر من الدقة، تأتي الحدود المسيطرة في الصيغ المستخدمة لحساب حركة الأجرام السماوية من حالات الرنين الأزلية، وهي أنواع من حالات الرنين بين الفترات تتسم بقدرٍ أكبر من العمومية، والتي تتقدَّم فيها مدارات العديد من الأجرام.

تتوقَّف الكيفية الدقيقة التي تتحرك بها الأجسام التي توجد في حالة رنين على نسب فتراتها، وكذلك مواقعها وسرعاتها المتجهة، لكنَّ النتيجة غالبًا ما تتمثَّل في إخلاء تلك المدارات. تشير نماذج المحاكاة الحاسوبية إلى أنَّ الكواكب التي تتوزَّع مسافاتها بصورة عشوائية غالبًا ما تتجه إلى مواقع تتفق بشكل تقريبي مع العلاقات التي يقترحها قانون تيتيوس–بوديه، بينما تكتسح حالات الرنين الفجوات. غير أنَّ الأمر لا يزال مبهمًا بعض الشيء.

يتضمن النظام الشمسي العديد من الأنظمة «المصغرة»، متمثلةً في أقمار الكواكب العملاقة. ونجد أنَّ النسب بين الفترات المدارية لأكبر ثلاثة أقمار للمشتري: آيو وأوروبا وجانيميد، هي ١:٢:٤ تقريبًا، وكل منها ضعف الفترة المدارية السابقة (انظر الفصل السابع). أما الفترة المدارية للقمر الرابع كاليستو فهي أقلُّ قليلًا من ضعف الفترة المدارية جانيميد. وفقًا لقانون كيبلر الثالث، فإنَّ أنصاف الأقطار المدارية تجمع بينها علاقات متشابهة، باستثناء أنَّه يجب أن نستبدل بالمضاعف ٢، أسه البالغ ٢ / ٣، والذي يساوي ١٫٥٨. أي أنَّ نصف القطر المداري لكل قمر من الأقمار، يبلغ ١٫٥٨ ضعف السابق عليه. تلك من الحالات التي يؤدي الرنين فيها إلى استقرار المدارات بدلًا من إخلائها، ثم إنَّ النسبة بين المسافات هي ١٫٥٨، وليست ٢، مثلما ينص على ذلك قانون تيتيوس–بوديه. غير أنَّ توزيع المسافات لا يزال يتبع قانونًا أسيًّا. ينطبق الأمر نفسه على أقمار زحل وأورانوس، مثلما أوضح ذلك ستانلي ديرموت في ستينيات القرن العشرين.[2] يُعرف هذا التوزيع للمسافات باسم «قانون ديرموت».

يُعد توزيع المسافات بالقانون الأسي نمطًا أكثر عمومية يتضمن تقريبًا جيدًا لقانون تيتيوس–بوديه. في عام ١٩٩٤، استنتجت بيرونجير ديبرول وفرانسوا جرانر، توزيع المسافات بالقانون الأسي لعدد من السدم الشمسية[3] النمطية قيد الانهيار، وذلك من خلال تطبيق مبدأين عامين. وكلاهما يعتمد على التناظر. فالغيمة تتسم بالتناظر المحوري، وتوزيع المادة هو نفسه تقريبًا على جميع مقاييس القياس؛ أي تناظر مقياسي. ويُعد التناظر المقياسي مألوفًا في العمليات المهمة التي يُعتقد أنها تؤثِّر في تشكيل الكواكب مثل التدفق الاضطرابي داخل السديم الشمسي.

يمكننا الآن أن نبحث فيما وراء النظام الشمسي. وحينها تصبح الأمور كلها فوضوية للغاية؛ إذ توجد مدارات الكواكب الخارجية المعروفة؛ أي الكواكب التي تدور حول نجوم أخرى، على العديد من الأشكال المختلفة لتوزيع المسافات، ومعظمها مختلف تمامًا عمَّا نجده في النظام الشمسي. ومن ناحية أخرى، فإنَّ الكواكب الخارجية المعروفة ليست سوى عينة منقوصة لما هو موجود منها بالفعل؛ فنحن لا نعرف في معظم الأحيان سوى كوكب واحد لنجم معيَّن، بالرغم من وجود كواكب أخرى للنجم على الأرجح. ذلك أنَّ طرق الكشف تركِّز على إيجاد كواكب كبيرة تدور بالقرب من نجومها الرئيسة.

حتى نضع خريطة للأنظمة الكوكبية «الكاملة» للعديد من النجوم، لن نتمكَّن من معرفةِ ما تبدو عليه أنظمة الكواكب الخارجية فعليًّا. غير أنه في عام ٢٠١٣، درس تيموثي بوفاريد وتشارلز لاينويفر ٦٩ من أنظمة الكواكب الخارجية التي يُعرَف أنها تحتوي على أربعة كواكب على الأقل، ووجدا أنَّ ٦٦ منها تتبع القوانين الأسية. وقد استخدما أيضًا القوانين الأسية الناتجة للتنبؤ بصفة مبدئية بالكواكب «الناقصة»؛ أي اكتشاف كوكب مثل سيريس على نظام خارجي. ومن بين الكواكب التي تنبأ القانون بها على هذا النحو، والتي بلغ عددها ٩٧، لم يُرصد حتى الآن سوى خمسة فقط. وحتى مع مراعاة صعوبة الكشف عن الكواكب الصغيرة، فإنَّ هذا العدد لا يزال مثبطًا بعض الشيء.

ليس ذلك كله سوى معارف مبدئية فحسب؛ لذا تحوَّل الانتباه إلى مبادئ أخرى قد تفسِّر الكيفية التي تنتظم بها الأنظمة الكوكبية. تعتمد هذه المبادئ على تفاصيل دقيقة في الديناميكا غير الخطية، وهي ليست تجريبية فحسب. غير أنَّ الأنماط العددية أقل وضوحًا فيها. فعلى وجه التحديد، أثبت مايكل ديلينيتس من الناحية الرياضية أنَّ مجال جاذبية المشتري يبدو أنه ما رتَّب الكواكب الأخرى بأكملها في نظام مترابط تصل بينه مجموعة طبيعية من «الأنابيب». وهذه الأنابيب التي لا يمكن الكشف عنها إلا من خلال سماتها الرياضية، توفِّر طرقًا طبيعية منخفضة الطاقة بين العوالم المختلفة. وسوف نناقش هذه الفكرة مع الأمور ذات الصلة في الفصل العاشر، حيث تتلاءم على نحوٍ أكثر تلقائية.

سواء أكان الأمر صدفة أم غير ذلك، فقد كان قانون تيتيوس-بوديه سببًا في استلهام بعض الاكتشافات المهمة.

لا يبدو من الكواكب للعين المجردة سوى الكواكب الخمسة الكلاسيكية: عطارد والزهرة والمريخ والمشتري وزحل. إضافةً إلى الأرض إذا أردت أن تكون متحذلقًا، لكننا لا

نرى سوى جزء صغير منها في المرة الواحدة. مع اختراع التلسكوب، تمكَّن علماء الفلك من رصد النجوم الخافتة بدرجةٍ لا تسمح برؤيتها بالعين المجردة وحدها، إضافة إلى بعض الأجسام الأخرى مثل المذنَّبات والسدم والأقمار. وفي ضوء حدود الإمكانيات التقنية في الماضي، كان علماء الفلك الأوائل يجدون أنَّ العثور على جسم جديد أسهل من تحديد ماهيته.

وهذه المشكلة تحديدًا، قد واجهت ويليام هيرشيل عام ١٧٨١ حين وجَّه التلسكوب الموجود في حديقة منزله الواقع في باث باتجاه كوكبة الثور، لاحظ وجود بقعة خافتة من الضوء بالقرب من النجم زيتا توري، وظنَّ في بادئ الأمر أنها «نجم ضبابي أو ربما مذنَّب». وبعد ذلك بأربع ليالٍ، كتب في مذكراته أنه «وجد أنها مذنَّب؛ لأنها غيَّرت مكانها.» وبعد ذلك بخمسة أسابيع، حين أخبر الجمعية الملكية باكتشافه، كان ما يزال يصفها بأنها مذنَّب. فعند رصد نجمٍ ما باستخدام عدسات تكبِّر بمقادير مختلفة، يظل النجم على شكل نقطة حتى مع أكبر درجة من التكبير، لكنَّ هذا الجسم الجديد كان يبدو أكبر مع زيادة درجة التكبير، «مثلما تفعل الكواكب،» كما أشار هيرشيل. غير أنَّ الأمر نفسه ينطبق على المذنَّبات، وقد اقتنع هيرشيل بأنه اكتشف مذنَّبًا جديدًا.

مع ظهور المزيد من المعلومات، اختلف معه بعض علماء الفلك، ومنهم الفلكي الملكي نيفيل ماسكلاين وأندريس ليكسيل وبوديه. وبحلول العام ١٧٨٣، كان ثمَّة توافق في الآراء على أنَّ الجسم الجديد كوكب، وكان ينبغي تسميته. كان الملك جورج الثالث قد خصَّص لهيرشيل ٢٠٠ جنيه إسترليني في العام، شريطة أن ينتقل بمسكنه قريبًا من قلعة ويندسور كي تنظر العائلة الملكية من تلسكوباته. اعتزم هيرشيل على أن يرد له حسن صنيعه وأراد أن يسميه «جورجيوم سيدوس» (نجم جورج). واقترح بوديه اسم أورانوس من الكلمة اللاتينية «أورانوس»، إله السماء لدى الإغريق، وقد فاز هذا الاسم برضا الجميع، رغم أنه الاسم الكوكبي الوحيد المشتق من اسم إله إغريقي لا إله روماني.

نهض لابلاس للفرصة بسرعة وحسب مدار أورانوس عام ١٧٨٣. وكانت النتيجة أنَّ الفترة المدارية ٨٤ عامًا، ومتوسط المسافة من الشمس ١٩ وحدة فلكية تقريبًا أو ما يساوي ثلاثة مليارات من الكيلومترات. وبالرغم من أنَّ مدار أورانوس دائري تقريبًا، فهو ينحرف عن المركز بأكثر مما ينحرف أي كوكب معروف، ويتراوح نصف قطره من ١٨ وحدة فلكية إلى ٢٠. مع مرور الأعوام، مكَّنتنا التلسكوبات الأفضل من قياس فترة دوران الكواكب وتساوي ١٧ ساعة و١٤ دقيقة، وهي حركة ارتجاعية؛ أي أنَّ الكوكب

يدور في الاتجاه المعاكس لجميع الكواكب الأخرى. يميل محور الكوكب بقيمة تزيد عن الزاوية القائمة قليلًا؛ فيقع في مستوى مدار الشمس بالنظام الشمسي، بدلًا من أن يكون متعامدًا عليه تقريبًا. ونتيجةً لذلك، يختبر أورانوس شكلًا متطرفًا من شمس منتصف الليل؛ إذ يتحمل كل قطب ٤٢ عامًا من ضوء النهار تتبعها ٤٢ عامًا من الظلام، ويكون أحد القطبين مظلمًا بينما يكون الآخر مضيئًا.

من الجلي أنَّ ثمَّة شيئًا غريبًا بشأن أورانوس. غير أنه من ناحية أخرى، يتفق مع قانون تيتيوس–بوديه تمامًا.

فور معرفة المدار، وربط المشاهدات السابقة بالعالم الجديد، صار من الواضح أنه قد رُصِد من قبل لكن هويته لم تُعرَّف على النحو الصحيح، وإنما كان يُعرَّف على أنه نجم أو مذنَّب. لا شك بأنه يُرى بالبصر الحاد، ومن المرجح أنه كان أحد «النجوم» التي ذُكِرت في فهرس هيبارخوس عام ١٢٨ قبل الميلاد، وذُكِرت بعد ذلك في «المجسطي» لبطليموس. وقد رصده أيضًا جون فلامستيد ست مرات عام ١٦٩٠، وظنَّ أنه نجم فسمَّاه ٣٤ توري. ورصده بيير لومونييه ١٢ مرة في الفترة ما بين ١٧٥٠ و١٧٦٩. إنَّ أورانوس يتحرك ببطء شديد بالرغم من أنه كوكب؛ لذا فليس من السهل ملاحظة أي تغير في موقعه.

حتى ذلك الوقت، كان الدور الأساسي للرياضيات في فهم النظام الشمسي وصفيًّا في المقام الأول؛ إذ تُقلِّص سلسلة طويلة من الملاحظات إلى مدار بسيط على شكل القطع الناقص. كان التنبؤ الوحيد الذي يمكن اشتقاقه من الرياضيات هو التنبؤ بموقع الكوكب في السماء في تواريخ مستقبلية. غير أنه مع مرور الوقت وتراكم ما يكفي من الملاحظات، بدا على نحوٍ متزايد أنَّ أورانوس يقع في المكان الخاطئ. فقد أجرى ألكسيس بوفار، وهو أحد تلامذة لابلاس، العديد من الملاحظات العالية الدقة للمشتري وزحل وأورانوس، واكتشف أيضًا ثمانية مذنَّبات. وثبت أنَّ الجداول التي أعدها لحركة المشتري وزحل دقيقة للغاية، لكنَّ أورانوس كان ينجرف باستمرار بعيدًا عن الموقع المتنبأ به. اقترح بوفارد أنَّه قد يكون ثمَّة كوكب أبعد يؤدي إلى اضطراب مدار أورانوس.

والمقصود بعبارة «يؤدي إلى اضطراب» هنا، هو «التأثير على». وإذا تمكَّنا من التعبير عن ذلك التأثير رياضيًّا فيما يتعلق بمدار هذا الكوكب الافتراضي الجديد، فيمكننا أن نعمل عكسيًّا لاستنتاج ذلك المدار. وحينها، سيعرف علماء الفلك المكان الذي ينبغي عليهم أن يبحثوا فيه، وإذا كان التنبؤ يستند إلى حقيقة، فسيتمكنون من إيجاد الكوكب الجديد.

غير أنَّ العقبة الكبيرة في هذه الطريقة هي أنَّ حركة أورانوس تتأثر تأثرًا كبيرًا بالشمس والمشتري وزحل. ربما يكون من الممكن تجاهل بقية أجسام النظام الشمسي، غير أنه لا يزال علينا التعامل مع خمسة أجسام منها. ما من صيغ دقيقة معروفة تتضمن ثلاثة أجسام، وسيكون الأمر أصعب كثيرًا لخمسة أجسام.

من حسن الحظ أنَّ علماء الرياضيات في ذلك العصر كانوا قد فكَّروا بالفعل في طريقةٍ للتغلب على تلك المشكلة. فاضطراب نظامٍ ما من الناحية الرياضية هو تأثير جديد يغيِّر حلول معادلاته. نجد على سبيل المثال أنَّ لحركة بندول «في الفراغ» بفعل الجاذبية حلًّا أنيقًا: يكرِّر البندول الذبذبات نفسها مرارًا وتكرارًا إلى الأبد. غير أنه عند وجود مقاومة الهواء، تتغير معادلة الحركة لتضمن القوة الإضافية المتمثلة في المقاومة. إنَّ هذا اضطراب لنظام البندول، وهو يدمِّر الذبذبة الدورية. فبدلًا من ذلك، تخفت هذه الذبذبات ويتوقَّف البندول في النهاية.

تؤدي الاضطرابات إلى معادلات أكثر تعقيدًا، وعادةً ما يكون حلها أصعب. بالرغم من ذلك، يمكن استخدام الاضطراب نفسه في بعض الأحيان لمعرفة الكيفية التي تتغير بها الحلول. وللقيام بهذا، نكتب المعادلات لإيجاد «الاختلاف» بين الحل بدون الاضطراب والحل في وجود الاضطراب. فإذا كان مقدار الاضطراب صغيرًا، فيمكننا اشتقاق معادلات تقرِّب هذا الاختلاف من خلال تجاهل حدود المعادلة التي تكون أصغر كثيرًا من الاضطراب. تؤدي هذه الحيلة إلى تبسيط المعادلات بالدرجة التي تكفي لحلها بطريقة مباشرة. لا يكون الحل الناتج دقيقًا، لكنه غالبًا ما يكون جيدًا بالدرجة الكافية للأغراض العملية.

إذا كان أورانوس هو الكوكب الوحيد، فسوف يتخذ مداره شكل قطع ناقص مثالي. غير أنَّ المشتري وزحل وجميع أجسام النظام الشمسي الأخرى التي نعرفها، تؤدي إلى اضطراب هذا المدار النموذجي. ذلك أنَّ مجالات جاذبيتها مجتمعة تغيِّر مدار أورانوس، ويمكن وصف هذا التغير بأنه تنوع بطيء في العناصر المدارية للقطع الناقص لأورانوس. بدرجة تقريبية جيدة، يتحرك أورانوس دائمًا في مدار ما على شكل القطع الناقص، لكننا نعرف الآن أنَّ هذا القطع الناقص لا يتخذ الشكل «نفسه» على الدوام. ذلك أنَّ الاضطرابات تغيِّر ببطء من شكله وميله.

وعلى هذا النحو، يمكننا حساب الطريقة التي سيتحرك بها أورانوس مع أخذ جميع الأجسام المهمة التي تؤدي إلى الاضطراب في الاعتبار. توضح الملاحظات أنَّ أورانوس لا يتبع هذا المدار المتوقَّع في حقيقة الأمر. إنما ينحرف عنه تدريجيًّا بطرق يمكن قياسها.

ولهذا، نضيف اضطرابًا افتراضيًّا بفعل كوكب مجهول نسميه X، ثم نحسب المدار الجديد الذي وقع عليه تأثير الاضطراب، ونساوي بينه وبين المدار المرصود، ثم نستنتج العناصر المدارية للكوكب X.

في عام ١٨٤٣، أجرى جون أدامز عملية حسابية بارعة، وحسب من خلالها العناصر المدارية للعالَم الافتراضي الجديد. وبحلول العام ١٨٤٥، كان أوربان لوفيرييه يعمل بصفة مستقلة على إجراء حسابات مشابهة. أرسل أدامز تنبؤاته إلى جورج أيري، الفلكي الملكي البريطاني في ذلك الوقت، يطلب منه البحث عن الكوكب الذي تشير إليه التنبؤات. كان أيري قلقًا بشأن بعض جوانب العملية الحسابية، وقد كان مخطئًا في ذلك مثلما اتضح، لكنَّ أدامز لم يستطِع طمأنته، فلم يُفعل شيء. في عام ١٨٤٦، نشر لوفيرييه تنبؤه الخاص به، والذي لم يُثر إلا قليلًا من الاهتمام مرة أخرى، إلى أن لاحظ أيري أنَّ كلا الرياضيين قد توصَّل إلى نتائج متشابهة للغاية. فأصدر تعليماته إلى جيمس تشاليز، مدير مرصد كامبريدج، بالبحث عن الكوكب الجديد، لكنَّ تشاليز لم يجد شيئًا.

بالرغم من ذلك، سرعان ما وجد يوهان جال نقطة خافتة من الضوء تبعد بمقدار درجة واحدة عن تنبؤ لوفيرييه، وتبعد بمقدار ١٢ درجة عن تنبؤ أدامز. بعد ذلك، اكتشف تشاليز أنه قد رصد الكوكب الجديد مرتين، لكنه لم يكن يمتلك أي خريطة محدَّثة للنجوم وكان مهملًا في العادة بعض الشيء؛ فغفل عنه. كانت بقعة الضوء التي رآها جال كوكبًا جديدًا سُمي لاحقًا بنبتون. كان اكتشافه انتصارًا كبيرًا للميكانيكا السماوية. فقد صارت الرياضيات آنذاك تكشف عن وجود عوالم غير معروفة، لا ترمِّز مدارات العوالم المعروفة فحسب.

صار النظام الشمسي يزخر حينها بثمانية كواكب، وعددٍ سريعِ النمو من «الكواكب الثانوية» أو الكويكبات (انظر الفصل الخامس). بالرغم من ذلك، فحتى قبل اكتشاف نبتون، كان بعض علماء الفلك، ومن بينهم بوفار وبيتر هانسن، مقتنعين بأنَّ اكتشاف جسم واحد جديد لا يمكن أن يفسِّر الانحراف في حركة أورانوس. وبدلًا من ذلك، كانوا يرون أنَّ هذه التفاوتات دليل على وجود «كوكبين» جديدين. ظلت هذه الفكرة تتردَّد جيئة وذهابًا على مدار ٩٠ عامًا أخرى.

في عام ١٨٩٤، أسَّس برسيفال لويل مرصدًا في فلاجستاف بأريزونا، وبعد مرور ١٢ عامًا، قرَّر أن يصنف جميع أوجه الانحراف في مدار أورانوس على نحو حاسم، وبدأ

مشروعًا سمَّاه الكوكب X. ويرمز X هنا إلى المجهول الرياضي لا العدد الروماني (وإن كان هذا هو المقصود لصار IX على أية حال). كان لويل قد دمَّر سمعته العلمية بعض الشيء بالترويج لفكرة وجود «قنوات» على المريخ، وأراد أن يصلحها؛ سيكون اكتشاف كوكب جديد مثالي لذلك. استخدم الطرق الرياضية للتنبؤ بالموقع الذي ينبغي أن يوجد فيه هذا العالَم الافتراضي، ثم قام ببحث منهجي، لكنه لم يتوصل إلى نتيجة. حاول مرة أخرى في الفترة ما بين عامي ١٩١٤ و١٩١٦، لكنه لم يجد شيئًا أيضًا.

في هذه الأثناء، توصَّل إدوارد بيكرينج، مدير مرصد كلية هارفارد، إلى التنبؤ الخاص به، وهو الكوكب O على مسافة ٥٢ وحدة فلكية. بحلول ذلك الوقت، كان عالِم الفلك البريطاني فيليب كويل، قد أعلن أنَّ أمر البحث برمَّته مسعًى لا طائل منه؛ إذ إنه يمكن تفسير الانحراف المفترض في حركة أورانوس، من خلال طرق أخرى.

مات لويل عام ١٩١٦. ونشب نزاع قانوني بين أرملته وبين المرصد أدَّى إلى إيقاف البحث عن الكوكب X حتى عام ١٩٢٥، حين دفع أخوه ثمنًا لتلسكوب جديد. أُوكل إلى كلايد تومباو مهمة تصوير مناطق سماء الليل مرتين، على فترة أسبوعين. كان ثمَّة جهاز بصري يقارن بين الصورتين، ويومض إن غيَّر أي شيء موقعه، مما يسترعي الانتباه إلى الحركة. أخذ صورة ثالثة لتسوية أي أمور ملتبسة. وفي بداية عام ١٩٣٠، كان يفحص منطقة في كوكبة الجوزاء وومض شيء. كان يقع في نطاق ست درجات من موقعٍ اقترحه لويل الذي بدا أنَّ اقتراحه صار مؤيدًا. وفور أن عُرِّف الجسم بأنه كوكب جديد، أوضح البحث في السجلات المحفوظة أنَّ صورًا قد التُقِطت له من قبل عام ١٩١٥، لكنه لم يُعرَف حينها بصفته كوكبًا.

أُطلِق على العالَم الجديد اسم بلوتو؛ إذ يمثِّل الحرفان الأول والثاني منه، أول حرفين من اسم لويل ولقبه.

اتضح أنَّ بلوتو أصغر كثيرًا مما كان متوقعًا؛ إذ لا تزيد كتلته عن عُشر كتلة الأرض. كان معنى هذا أنه لا يمكن في حقيقة الأمر أن يفسِّر أوجه الانحراف التي دفعت لويل وآخرين إلى التنبؤ بوجوده. حين تأكدت كتلته المنخفضة عام ١٩٧٨، واصل بضعة من علماء الفلك، البحث عن الكوكب X؛ اعتقادًا منهم بأنَّ بلوتو لم يكن سوى إشارة مضللة، ولا بد أنَّ ثمَّة كوكبًا آخرَ مجهولًا أضخمَ يقبع في مكانٍ ما. حين استخدم مايلز ستانديش البيانات المستمدة من تحليق المسبار «فوياجر» عام ١٩٨٩ بالقرب من نبتون، لتحسين الأرقام المتعلقة بكتلة نبتون، اختفى الانحراف في مدار أورانوس. لم يكن تنبؤ لويل سوى صدفة حالفه فيها الحظ.

غريب بلوتو. فمداره يميل بمقدار ١٧ درجة إلى مدار الشمس، وهو على درجة عالية من الانحراف المركزي، حتى إنه يكون لبعض الوقت أقرب إلى الشمس من نبتون. غير أنه ما من احتمال بتصادمهما معًا، ويعود ذلك لسببين. يتمثَّل السبب الأول في الزاوية بين مستوييهما المداريين؛ فمداراهما لا يتقاطعان إلا عند خط التقاء ذلكما المستويين. وحتى في هذه المرحلة، لا بد للعالَمين أن يمرَّا بالنقطة نفسها على هذا الخط في الوقت نفسه. وحينها يظهر السبب الثاني. ويتمثَّل في أنَّ بلوتو مقيد مع نبتون في رنين بنسبة ٣:٢. ومن ثمَّ، فإنَّ الجسمين يكرِّران الحركات نفسها بصفة أساسية؛ إذ يكرِّرها بلوتو كل دورتين، ويكرِّرها نبتون كل ثلاث دورات؛ أي كل ٤٩٥ عامًا. وبما أنهما لم يتصادما في الماضي، فلن يتصادما في المستقبل، وسيستمر ذلك على أقل تقديرٍ ما لم تحدث عملية ترتيب واسعة النطاق للأجسام الأخرى في النظام الشمسي، وتؤدي إلى اضطراب علاقتهما المريحة.

استمر علماء الفلك في تفتيش النظام الشمسي الخارجي بحثًا عن أجرام جديدة. واكتشفوا أنَّ لبلوتو قمرًا كبيرًا نسبيًّا، لكنهم لم يجدوا شيئًا بعد مدار نبتون حتى عام ١٩٩٢، حين ظهر جسم صغير عُرِف حينها باسم $1992\ QB_1$ (15760). لقد كان مبهمًا للغاية حتى إنه لا يزال يتخذ الاسم نفسه حتى الآن (وقد رُفِض اقتراح بتسميته «سمايلي»؛ لأنه مستخدَم لكويكب بالفعل)، لكن ثبت أنه أول مجموعة من الأجرام الوراء نبتونية، التي نعرف منها ما يزيد عن ١٥٠٠. توجد من بينها بضعة أجسام أكبر غير أنها لا تزال أصغر من بلوتو: أكبرها «إيريس» ويليه «ميكميك» ثم «هاوميا» ثم $2007\ OR_{10}$.

كل هذه الأجسام خفيفة للغاية وبعيدة بما لا يسمح بالتنبؤ بها من خلال تأثيراتها المتعلقة بالجاذبية على الأجسام الأخرى، وقد اكتُشِفت من خلال البحث في الصور. بالرغم من ذلك، توجد بعض السمات الرياضية الجديرة بالملاحظة تتعلَّق بتأثيرات الأجسام الأخرى «عليها». بين الوحدة الفلكية ٣٠ والوحدة الفلكية ٥٥، يقع حزام كايبر الذي تدور غالبية أعضائه في مدارات دائرية تقريبًا بالقرب من مدار الشمس. يقع بعض هذه الأجسام الوراء نبتونية في مدارات رنينية مع نبتون. تُسمى تلك الأجسام التي توجد في علاقة رنين بنسبة ٣:٢، باسم بلوتينوس لأنها تتضمن بلوتو. وتُعرف الأجسام التي توجد في علاقة رنين بنسبة ٢:١؛ حيث تكون فترتها المدارية ضعف فترة نبتون، باسم توتينوس. أما البقية فتعرف باسم حزام كايبر التقليدية، أو كويبوانوس،[4] تدور هي أيضًا في مدارات

دائرية تقريبًا، لكنها لا تشهد أي اضطرابات مؤثرة من نبتون. وبعد ذلك بمسافة أبعد، يوجد القرص المبعثر. وفيه توجد أجسام شبيهة بالكويكبات تدور في مدارات تنحرف عن المركز، وتميل في معظم الأحيان بزاوية كبيرة على مدار الشمس. ومن بين هذه الأجسام «إيريس» و«سيدنا».

مع اكتشاف المزيد والمزيد من الأجسام الوراء نبتونية، بدأ بعض علماء الفلك يشعرون أنه من غير المنطقي أن يُسمى بلوتو كوكبًا دون إيريس، الذي كانوا يعتقدون أنه أكبر قليلًا. الأمر الغريب أنَّ الصور التي التقطها المسبار «نيو هواريزونز»، تظهر أنَّ إيريس أصغر قليلًا من بلوتو.[5] غير أنه إذا صُنِّفت أجسام وراء نبتونية أخرى في فئة الكواكب، فسوف يكون بعضها أصغر من الكويكب (أو الكوكب الثانوي) سيريس. بعد الكثير من النقاشات الحامية، أنزل الاتحاد الفلكي الدولي بلوتو من مرتبة الكواكب إلى مرتبة الكواكب القزمة، وانضم إليه فيها سيريس وهاوميا وميكميك وإيريس. وبعناية، صِيغ تعريفان جديدان لمصطلحي «كوكب» و«كوكب قزم»، لتسهيل دخول الأجرام إلى هذين التصنيفين. بالرغم من ذلك، فلا يزال من غير الواضح حتى الآن ما إذا كان هاوميا وميكميك وإيريس تلائم التعريف بالفعل أم لا. يخمِّن العلماء أيضًا وجودَ بضع مئات أخرى من الكواكب القزمة في حزام كايبر، ووجودَ ما قد يصل إلى ١٠ آلاف منها في القرص المبعثر.

حين تنجح حيلة علمية جديدة، من المنطقي أن يحاول العلماء تجربتها على مشكلات مشابهة. وقد نجحت حيلة الاضطراب على نحوٍ بارع في التنبؤ لوجود نبتون وموقعه. وحين جرَّبها العلماء في حالة بلوتو، بدا أنها نجحت على نحوٍ بارع أيضًا، إلى أن أدرك علماء الفلك أنَّ بلوتو صغير جدًّا بدرجةٍ لا تسمح له بأن يؤدي إلى أوجه الانحراف التي استُخدِمت في التنبؤ به.

فشلت الحيلة فشلًا ذريعًا مع كوكب يُدعى فولكان. وليس ذلك بالكوكب الخيالي المذكور في مسلسل «ستار تريك»، الذي كان موطن مستر سبوك، والذي يدور، وفقًا لكاتب الخيال العلمي جيمس بليش، بالنجم ٤٠ إريداني إيه. إنما هو الكوكب الخيالي الذي يدور بنجم باهت واعتيادي بعض الشيء يُعرف لدى كتَّاب الخيال العلمي باسم سول. أو يُعرف بالاسم الأكثر شهرة له، وهو الشمس. يعلِّمنا فولكان دروسًا عديدة بشأن العلم، لا الدرس الواضح المتمثل في إمكانية ارتكاب الأخطاء فحسب؛ بل النقطة الأعم المتمثلة في أنَّ إدراك أخطاء الماضي يمكن أن يمنعنا من تكرارها. ويرتبط التنبؤ به بظهور نظرية

النسبية بوصفها تحسينًا على الفيزياء النيوتونية. غير أننا سنحكي المزيدَ من هذه القصة لاحقًا.

لقد اكتُشِف نبتون بسبب الانحراف في مدار أورانوس. واقتُرِح فولكان لتفسير الانحراف في مدار عطارد، ولم يكن صاحب الاقتراح سوى لوفيرييه في عمل يسبق عمله المتعلق بنبتون. ففي عام ١٨٤٠، أراد مدير مرصد باريس، فرانسوا أراجو، أن يطبِّق جاذبية نيوتن على مدار عطارد، وطلب من لوفيرييه أن يجري الحسابات اللازمة. حين يمر عطارد أمام الشمس في حدثٍ يُعرف بالعبور، يمكن اختبار النظرية برصد وقت بدء العبور ونهايته. حدث عبورٌ في عام ١٨٤٣، وكان لوفيرييه قد أكمل حساباته قبلها بوقت قليل؛ مما كان يتيح له التنبؤ بالتوقيت. مُني بالخيبة؛ إذ جاءت الملاحظات معارضة للنظرية. لذا، عاد لوفيرييه مرة أخرى إلى لوح الكتابة، وأعدَّ نموذجًا أكثر دقة يستند إلى ملاحظات عديدة و١٤ حالة من حالات العبور. وبحلول العام ١٨٥٩، كان قد لاحظ جانبًا صغيرًا ومحيرًا من حركة عطارد يفسِّر السبب في خطئه الأصلي، ونشر نتائجه.

تُعرف النقطة التي يقترب فيها مدار عطارد الإهليلجي من الشمس بأكبر درجةٍ باسم الحضيض الشمسي (بالإنجليزية: perihelion، peri = قريب، helios = الشمس)، وهي سمة محدَّدة جيدًا. مع مرور الوقت، تدور نقطة الحضيض الشمسي لعطارد ببطء مقارنةً بخلفية النجوم البعيدة (الثابتة). حقيقة الأمر أنَّ المدار بأكمله يتمحور مع الشمس في بؤرتها، ويُطلق على هذه الظاهرة مصطلح التقدم المداري. ثمَّة نتيجة رياضية تُعرف باسم مبرهنة نيوتن للمدارات الدوَّارة،[6] تتنبأ بهذا التأثير بصفته نتيجةً للاضطرابات التي تحدث بفعل كواكب أخرى. بالرغم من ذلك، حين حاول لوفيرييه تطبيق المبرهنة على الملاحظات، كانت الأعداد الناتجة خاطئة بدرجة طفيفة. كانت مبرهنة نيوتن تتنبأ بأنَّ الحضيض الشمسي لعطارد ينبغي أن يتقدم بزاوية تبلغ ٥٣٢ ثانية قوسية كل ١٠٠ عام، وكان العدد المرصود ٥٧٥ ثانية قوسية. ثمَّة شيء كان يتسبَّب في التقدم بمقدار ٤٣ ثانية قوسية إضافية كل قرن. اقترح لوفيرييه أنَّ كوكبًا غير مكتشف أقرب إلى الشمس من عطارد هو المسئول عن ذلك، وسمَّاه فولكان، على اسم إله النار الروماني.

إنَّ وهج الشمس سيغطي على أي ضوء منعكس من كوكبٍ يدور على مثل تلك الدرجة من القرب؛ لذا فإنَّ الطريقة العملية الوحيدة لرصد فولكان ستكون في أثناء إحدى مرات العبور. حينها ينبغي أن يظهر على صورة نقطة ضئيلة قاتمة. وسرعان ما أعلن الفلكي الهاوي إدموند ليسكاربولت أنه وجد نقطة شبيهة لم تكن بقعة شمسية لأنها

كانت تتحرك بالسرعة الخاطئة. أعلن لوفيرييه اكتشاف فولكان عام ١٨٦٠، وبناءً على هذا، مُنِح وسام جوقة الشرف.

من سوء حظ لوفيرييه وليسكاربولت أنَّ فلكيًّا آخر يمتلك معدات أفضل هو إيمانويل ليا، كان هو أيضًا يرصد الشمس بناءً على طلب الحكومة البرازيلية، ولم يرَ شيئًا من هذا. كانت سمعته على المحك، وأنكر حدوث مثل ذلك العبور. صارت النقاشات حامية وملتبسة. حين مات لوفيرييه عام ١٨٧٧، كان لا يزال يعتقد أنه قد اكتشف كوكبًا جديدًا. دون تأييد لوفيرييه، فقدت نظرية كوكب فولكان زخمها، وسرعان ما صار الاتفاق في الآراء واضحًا: كان ليسكاربولت مخطئًا. ظل تنبؤ لوفيرييه غير مؤكد، وكان التشكك واسع الانتشار. اختفى الاهتمام بالأمر بشكل كلي تمامًا عام ١٩١٥، حين استخدم أينشتاين نظريته الجديدة للنسبية العامة في استنتاج تقدم مداري تبلغ قيمته ٤٢٫٩٨ ثانية قوسية دون الحاجة إلى افتراض كوكب جديد. بُرِّئت النسبية، وطُرِح فولكان في كومة المخلفات.

إننا لا نعرف يقينًا حتى الآن ما إذا كانت توجد أجسام أخرى بين عطارد والشمس أم لا، وإن كان لأحدها وجود فلا بد أنه سيكون صغيرًا للغاية. لقد أعاد هنري كورتن تحليل صور الكسوف الشمسي لعام ١٩٧٠، وذكر أنه كشف عن سبعة أجسام على الأقل. لم يمكن تحديد مداراتها، ولم تتأكد المزاعم. غير أنَّ البحث عن كواكب الفلكانويد، مثلما تُسمى، لا يزال مستمرًّا.[7]

الفصل الخامس

الشرطة السماوية

> «لم يكن لدى الديناصورات برنامج للفضاء؛ لذا فهي ليست هنا للحديث عن هذه المشكلة. غير أننا هنا، ولدينا القدرة على فعل شيء بشأنها. أنا لا أريد أن أصبح عارًا على المجرة أن تكون لدي القدرة على تغيير مسار كويكبٍ ما، ولا أفعل ذلك وينتهي بي الحال منقرضًا.»
>
> نيل ديجراس تايسون، «سجلات الفضاء»

ثمَّة أسطول من السفن الحربية بين النجمية يطلق صواعق مستعرة من الطاقة الخالصة يتعقب فرقة صغيرة شجاعة من المناضلين من أجل الحرية؛ فتلتجئ للاختباء في حزامٍ للكويكبات، وتمر بعنف عبر عاصفة من صخور متدحرجة تبلغ الواحدة منها حجم منهاتن، ويصطدم بعضها ببعض على الدوام. تتبعها السفن الحربية وتبخر الصخور الصغيرة بأشعة الليزر بينما تتقبل ضربات عديدة من شظايا الصخور. وفي مناورة بارعة، ترتد المركبة الهاربة على نفسها وتغوص في نفق عميق في مركز إحدى الفُوَّهات. غير أنَّ دواعي قلقها قد بدأت للتو …

تلك صورة سنيمائية آسرة.

وهي أيضًا محض هراء. ولست أقصد بهذا أسطول السفن الحربية ولا صواعق الطاقة ولا ثائري المجرات. إنني حتى لا أقصد الدودة المتوحشة التي تقبع في نهاية النفق. كل ذلك «قد» يحدث ذات يوم. ما أقصده هو تلك العاصفة من الصخور المتدحرجة. فذلك محال.

أعتقد أنَّ الأمر كله يعود إلى تلك الاستعارة التي أسيء اختيارها؛ حزام.

في يوم من الأيام، لم يكن في النظام الشمسي حزام مثلما كان مفهومًا عنه حينها. وإنما كان يوجد بدلًا منه فجوة. وفقًا لقانون تيتيوس–بوديه، كان ينبغي أن يوجد كوكب بين المريخ والمشتري، لكنه لم يكن موجودًا. ولو كان موجودًا، لرآه القدماء وربطوه بإله آخر.

حين اكتُشِف أورانوس، اتضح أنه يتلاءم تمامًا مع النمط الرياضي لقانون تيتيوس–بوديه، حتى إنَّ علماء الفلك تشجعوا لسد الثغرة الموجودة بين المريخ والمشتري. وقد نجحوا في ذلك مثلما رأينا في الفصل السابق. دشَّن البارون فرانز زافير فون زاك «الجمعية الملكية المتحدة» عام ١٨٠٠، وكانت تضم حينها ٢٥ عضوًا، من بينهم ماسكلاين، وشارل مسييه، وويليام وهيرشيل، وهاينريش أولبرز. وبسبب تفاني هذه المجموعة في ترتيب النظام الشمسي الجامح، صارت تُعرف باسم «الشرطة السماوية». عُيِّن لكل راصد منهم قطعة من مدار الشمس يبلغ حجمها ١٥ درجة، وتُسنَد إليه مهمة البحث عن الكوكب المفقود في تلك المنطقة.

مثلما يحدث كثيرًا في مثل هذه الأمور، تفوَّق على هذه الطريقة المنهجية المنظمة غريبٌ قد حالفه الحظ، وهو جيوسبه بياتسي بروفيسور علم الفلك في جامعة باليرمو بصقلية. لم يكن بياتسي يبحث عن كوكب، بل نجم؛ «النجم السابع والثمانين في «فهرس السيد لوكيل»». وفي بداية العام ١٨٠١، رأى بالقرب من النجم الذي كان ينشده، نقطة أخرى من الضوء لا تتطابق مع أي شيء مذكور في فهارس النجوم. بعد الاستمرار في رصد هذا المتطفل، وجد أنه يتحرك. لقد اكتُشِف بالتحديد في الموقع الذي كان يستلزمه قانون تيتيوس–بوديه. أطلق عليه بياتسي اسم سيريس تيمنًا بإلهة الحصاد الرومانية، والتي كانت أيضًا هي الإلهة الراعية لمدينة صقلية. ظن في البداية أنه اكتشف مذنَّبًا جديدًا، لكنه كان يفتقر إلى الذؤابة المميِّزة. وقد كتب عن ذلك: «لقد خطر لي عدة مرات أنه قد يكون شيئًا أفضل من مذنَّب.» أي أن يكون كوكبًا.

يُعد سيريس صغيرًا بعض الشيء وفقًا للمعايير الكوكبية، وكاد الفلكيون أن يفقدوه مجددًا. لم يكن لديهم سوى قدر ضئيل من البيانات المتعلقة بمداره، وقبل أن يتمكنوا من الحصول على المزيد من القياسات، نقلت حركة الأرض خط رؤية الجسم الجديد إلى موقعٍ شديد القرب من الشمس؛ لذا فقد غمر وهجها ضوءه الخافت. كان من المتوقَّع أن يظهر مجددًا بعد بضعة شهور، لكنَّ المشاهدات كانت شحيحة للغاية مما يجعل الموقع غير يقيني بدرجة كبيرة على الأرجح. ولما كان الفلكيون لا يرغبون في بدء البحث بأكمله من جديد، فقد طلبوا من المجتمع العلمي تقديم تنبؤ يجدر الاعتماد عليه. نهض للتحدي،

كارل فريدريش جاوس الذي لم يكن معروفًا حينها للجمهور. لقد اخترع طريقة جديدة لاستنتاج مدار بناءً على ثلاث مشاهدات أو أكثر، وهي تُعرف الآن بطريقة جاوس. حين عاود سيريس الظهور في موعده على بُعد نصف درجة من الموقع المتنبأ به، ذاع صيت جاوس بكونه رياضيًّا عظيمًا. وفي عام ١٨٠٧، عُيِّن في منصب بروفيسور علم الفلك ومدير مرصد جامعة جوتينجن؛ حيث ظل يعمل بقية حياته.

لكي يتمكَّن جاوس من التنبؤ بمكان ظهور سيريس، اخترع عدة تقنيات عددية مهمة للتقريب. كان من بينها نسخة لما نعرفه اليوم باسم تحويل فورييه السريع، والتي أُعيد اكتشافها عام ١٩٦٥ على يد جيمس كولي وجون تاكي. وُجِدت أفكار جاوس بشأن الموضوع بين أوراقه غير المنشورة وظهرت بعد وفاته في أعماله المُجمَّعة. كان يرى هذه الطريقة باعتبارها نوعًا من الاستكمال المثلثي، أي إدخال نقاط بيانات جديدة بين نقاط بيانات موجودة بالفعل، بطريقة سلسة. واليوم تُعد هذه الطريقة من الخوارزميات المهمة في معالجة الإشارات، وتُستخدم في الماسحات الطبية والكاميرات الرقمية. تلك هي قوة الرياضيات، وما سمَّاه الفيزيائي يوجين ويجنر، «فعاليتها المفرطة».[1]

بناءً على هذا النجاح، وضع جاوس نظرية شاملة عن حركة الكويكبات التي تضطرب بفعل الكواكب الكبيرة، وقد ظهرت في عام ١٨٠٩ تحت عنوان «نظرية عن حركة الأجرام السماوية التي تتحرك في مقاطع مخروطية حول الشمس». في هذا العمل، أجرى جاوس تنقيحات وتحسينات على طريقة إحصائية قدَّمها ليجندر عام ١٨٠٥، وتُعرف الآن بطريقة المربعات الصغرى. ذكر أيضًا أنَّ الفكرة خطرت له لأول مرة عام ١٧٩٥، لكنه لم ينشرها، (كما هو معتاد من جاوس). وتُستخدم هذه الطريقة في التوصل إلى قيم أكثر دقة من مجموعة من القياسات، وكل منها عرضة للأخطاء العشوائية. تقوم هذه الطريقة في أبسط صورة لها على أساس اختيار القيمة التي تحد من إجمالي الخطأ. وتوجد منها تنويعات أكثر تعقيدًا تُستخدم في مطابقة الخط المستقيم الأنسب على البيانات المتعلقة بالكيفية التي يرتبط بها أحد المتغيرات بآخر، أو معالجة مسائل متشابهة للعديد من المتغيرات. يستخدم الإحصائيون مثل هذه الطرق بصفة يومية.

حين توصَّل العلماء إلى العناصر المدارية لسيريس، وصار من الممكن إيجاده حين يلزم ذلك، اتضح أنه ليس وحيدًا. ثمَّة أجرام مشابهة له، بأحجام مشابهة أو أصغر، كانت تدور في مدارات مشابهة. وكلما زادت كفاءة التلسكوب الذي تنظر منه، تمكنت من رؤية المزيد منها، وبدت أصغر.

وفي وقت لاحق من عام ١٨٠١، تمكَّن أحد أفراد الشرطة السماوية، أولبرز، من العثور على أحد هذه الأجسام، وسمَّاه بالا. وسرعان ما أتى بتفسير مبتكر للسبب في عدم وجود كوكب كبير واحد ووجود جسمين (أو أكثر). وهو أنَّه كان يوجد في هذا المدار من قبل كوكب كبير، لكنه تهشم في اصطدام مع مذنَّب أو انفجار بركاني. بدت هذه الفكرة منطقية لبعض الوقت، بسبب اكتشاف المزيد والمزيد من الأجزاء المتهشمة: جونو (١٨٠٤)، وفيستا (١٨٠٧)، وآستريا (١٨٤٥)، وهيبي وإريس وفلورا (١٨٤٧) وميتيس (١٨٤٨)، وهيجيا (١٨٤٩)، وبارثينوبي وفيكتوريا وإجيريا (١٨٥٠)، وغير ذلك.

يمكن رؤية فيستا بالعين المجردة في بعض الأحيان، إذا كانت ظروف الرصد مواتية. كان بمقدور الأقدمين اكتشافه.

جرت التقاليد بأن يكون لكل كوكب رمزه الخاص؛ لذا فقد مُنِح كلٌّ من الأجرام الحديثة الاكتشاف رمزه الغامض أيضًا. غير أنه مع كثرة الأجرام الجديدة، اتضح أنَّ هذا النظام مزعج للغاية، واستُعيض عنه بأنظمةٍ أكثر اعتيادية، تطورت إلى النظام المُستخدم حاليًّا، والذي يتمثَّل في استخدام عدد يشير إلى ترتيب الاكتشاف، واسم أو لقب مؤقت، وتاريخ الاكتشاف، ومثال ذلك: ١٠ هيجيا ١٨٤٩.

في التلسكوبات القوية بالدرجة الكافية، يبدو الكوكب على شكل قرص. وقد كانت هذه الأجرام صغيرة للغاية حتى إنها بدت على شكل نقط، مثلما تبدو النجوم. ولهذا، فقد اقترح هيرشيل عام ١٨٠٢ اسمًا لها يُستخدم لأغراض العمل:

> إنها شديدة الشبه بالنجوم الصغيرة حتى إنه ليصعب التفريق بينهما. وانطلاقًا من هذا، أرغب في تسميتها بالنُّجيمات إن كان لي ذلك، مع الاحتفاظ لنفسي بالحرية في تغيير الاسم، إن تراءى لي اسم آخر أكثر تعبيرًا عن طبيعتها.

ظل علماء الفلك لبعض الوقت يسمونها بالكواكب أو الكواكب الثانوية، لكنَّ اسم «نجيم» هو ما ساد في النهاية.

لم تصمد نظرية أولبرز لوقت طويل. فقد اتضح أنَّ التركيب الكيميائي للكويكبات لا يتفق مع كونها شظايا من جسم واحد كبير، وكتلتها المجتمعة صغيرة للغاية. فالأرجح أنها غبار كوني قد تبقَّى من جسم كان سيصبح كوكبًا لولا أنه لم يتشكَّل لأنَّ المشتري تسبَّب في قدر كبير من الاضطراب. لقد كانت التصادمات بين الجسيمات الكويكبية أكثر انتشارًا في هذه المنطقة من غيرها، وكانت تؤدي إلى انفصالها أكثر مما كانت تؤدي إلى

تجميعها. وقد حدث هذا بسبب انتقال المشتري باتجاه الشمس، كما ذكرنا في الفصل الأول.

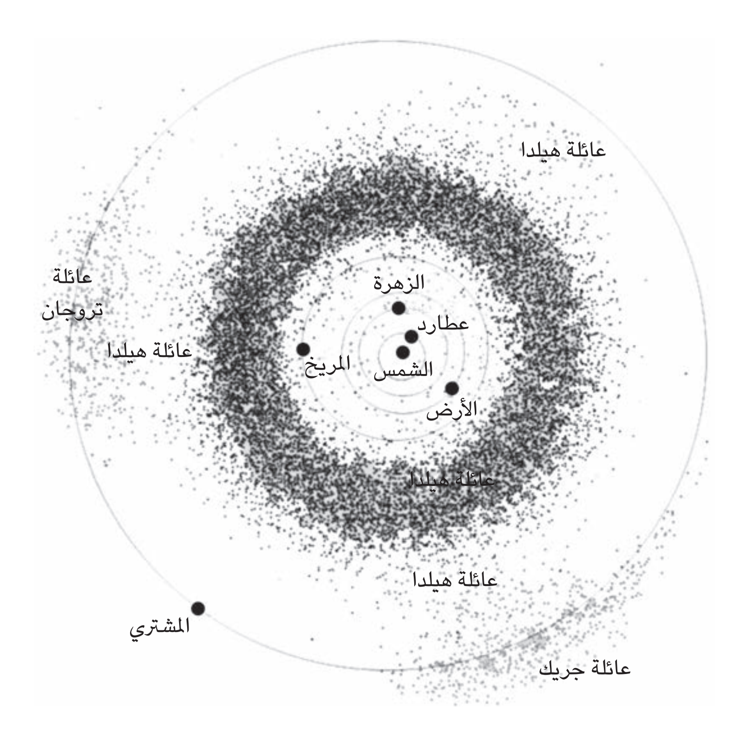
لم تكن المشكلة في المشتري تحديدًا؛ بل في المدارات الرنينية. وتحدث مدارات الرنين، كما ذكرنا آنفًا، حين تمثِّل فترة أحد المدارين كسرًا بسيطًا من فترة مدار جسم آخر، هو المشتري في هذه الحالة. ومن ثمَّ يتبع الجسمان دائرة حيث ينتهيان في الموقعين النسبيين نفسيهما اللذين كانا يشغلانهما عند البدء. ويستمر هذا في الحدوث فيسبب قدرًا كبيرًا من الاضطراب. إذا لم تكن النسبة بين الفترتَين كسرًا بسيطًا، تُغشَّى مثل هذه النتائج بعض الشيء. إنَّ ما يحدث تحديدًا يتوقف على الكسر، لكن يوجد احتمالان أساسيان. إما أن يكون توزيع الكويكبات مُركَّزًا بالقرب من المدار؛ لذا يوجد منها هناك أكثر مما يوجد عادةً في أي مكان آخر، وإما أن يخلو ذلك المدار منها تمامًا.

لو ظلَّ المشتري في المدار نفسه، لاستقرت هذه العملية في نهاية المطاف على تركُّز الكويكبات بالقرب من مدارات الرنين المستقرة، وتفادي غير المستقرة منها. أما لو بدأ المشتري في الحركة، مثلما يعتقد الفلكيون الآن أنه تحرك بالفعل، لاكتسحت مناطق الرنين حزام الكويكبات، وتسبَّبت في حدوث اضطراب. وقبل أن يستقر أي شيء في رنين مستقر بسيط، لن يعود المدار المعني رنينيًّا، وسيضطرب كل شيء من جديد. وبهذا، فقد أدَّت حركة المشتري إلى تحريك الكويكبات بقوة، ومن ثمَّ اضطراب ديناميكياتها وزيادة احتمال التصادم. وتُعد الكواكب الداخلية دليلًا على أنَّ الجسيمات الكوكبية قد تجمَّعت داخل مدارات الكواكب العملاقة، مما يشير إلى أنه كان يوجد الكثير من الجسيمات الكوكبية ذات يوم. من المرجَّح أن يؤدي وجود العديد من الأجسام العملاقة إلى التأثير بالاضطراب بعضها على بعض، مثلما حدث في حالة المشتري وزحل، مما سيؤدي إلى تغيير مداراتها، وتغيير المدارات يتضمن مناطق الرنين المكتسحة، والتي تهشم أي جسيمات كوكبية توجد داخل مدار العملاق الموجود في أبعد نقطة بالداخل. موجز القول أنَّ وجود الكواكب الداخلية مع كوكبين عملاقين أو أكثر، ينطوي على وجود الكويكبات.

حزام.

وفقًا لما أستطيع قوله، لا أحد يعرف على وجه التحديد أول مَن استخدم مصطلح «حزام الكويكبات»، لكنَّ المؤكد أنه كان مستخدمًا بحلول عام ١٨٥٠ حين ذكرت إليس أوتَّه في ترجمتها لكتاب «الكون» لصاحبه ألكسندر فون هومبولت، عند مناقشة الزخات الشهابية، أنَّ بعضها «يشكِّل على الأرجح جزءًا من حزام كويكبات يتقاطع مع مدار

الأرض». ويذكر روبرت مان عام ١٨٥٢ في كتابه «دليل لمعرفة السماء»: «توجد مدارات الكويكبات في حزام عريض من الفضاء.» وهي كذلك بالفعل. فالصور توضِّح توزيع الكويكبات الأساسية على مدارات الكواكب إلى الخارج حتى المشتري. وتهيمن على الصورة حلقة ضخمة مغبشة تتكوَّن من آلاف الكويكبات. سأعود إلى كويكبات هيلدا وتروجان وجريك لاحقًا.



حزام الكويكبات، مع ثلاثة تكتلات بارزة من الكويكبات: هيلدا وتروجان وجريك. الصورة مرسومة في إطار دوراني كي يبقى المشتري ثابتًا.

إنَّ هذه الصورة معززة بالمصطلح «حزام»، هي السبب على الأرجح في أنَّ أفلام «ستار وورز»، عادةً ما تصوِّر الكويكبات في هيئة حشد من الصخور المتراصة التي يصطدم بعضها ببعض على الدوام، والأسوأ من هذا أنَّ برامج تبسيط العلوم التليفزيونية، التي يجدر بمنتجيها حقًّا أن يكونوا على دراية أكبر، تصوِّرها على هذا النحو أيضًا. إنها صورة

سينمائية مثيرة، لكنها محض هراء. صحيح، يوجد الكثير من الصخور هناك، لكن يوجد قدر ضخم للغاية من «الفضاء» أيضًا. إنَّ حِسبة تقريبية توضح أنَّ المسافة المعتادة بين الكويكبات التي يبلغ قطرها ١٠٠ متر أو أكثر هي ٦٠ ألف كيلومتر تقريبًا. تبلغ هذه المسافة خمسة أضعاف قطر الأرض تقريبًا.[2] لذا، بالرغم مما تصوِّره أفلام هوليوود، فلن ترى، إذا كنت في حزام الكويكبات، مئات الصخور تطفو من حولك. ولن ترى أي شيء آخر على الأرجح.

تتمثَّل المشكلة الحقيقية في هذه الصورة المغبشة. ففي رسمٍ تخطيطي تُستخدم فيه النقاط لتمثيل الأجرام المختلفة، تشكِّل الكويكبات حلقة كثيفة مرقطة. ولهذا فإننا نتوقَّع أن يكون الحزام الفعلي بهذا القدر من الكثافة. غير أنَّ كل نقطةٍ في الصورة تمثِّل منطقة من الفضاء تمتد إلى «ثلاثة ملايين من الكيلومترات» تقريبًا. ينطبق الأمر نفسه على سماتٍ شبيهةٍ في النظام الشمسي. فحزام كايبر ليس بحزام، وسحابة أورط ليست بسحابة. وكلاهما مساحات من الفضاء تكاد تكون خالية. غير أنه يوجد «الكثير» جدًّا من الفضاء حتى إنَّ المساحة الضئيلة التي لا تكون فضاءً تتكوَّن من أعداد ضخمة للغاية من الأجرام السماوية، تتكوَّن بصفة أساسية من الصخور والجليد. وسوف نناقش هاتين المنطقتين لاحقًا.

إنَّ استقاء الأنماط من البيانات ضربٌ من السحر الأسود، لكنَّ التقنيات الرياضية يمكن أن تساعد في ذلك. ويتمثَّل أحد المبادئ الأساسيَّة لتحقيق هذا الغرض في أنَّ الطرق المختلفة لتقديم البيانات أو تمثيلها يمكن أن توضح سمات مختلفة.

يشير الرسم التوضيحي إلى أنَّ الكويكبات تتوزَّع على حزام الكويكبات بصورة متساوية تقريبًا. فحلقة النقاط تبدو بالكثافة نفسها تقريبًا في كل مكان، دون فجوات. غير أننا نؤكد مرةً أخرى على أنَّ الصورة مضللة. ذلك أنَّ مقياسها مضغوط للغاية بدرجة لا تسمح بتوضيح التفاصيل الفعلية، لكن الأهم أنه يوضح «مواقع» الكويكبات. ولكي نرى تركيبًا مثيرًا للاهتمام، سوى التجمُّعين المعنونَين بتروجان وجريك اللذين سأعود إليهما لاحقًا، علينا أن ننظر من على مسافة. إنَّ ما يهم حقًّا في الواقع، هو الفترات المدارية، لكنها ترتبط بالمسافة وفقًا لقانون كيبلر الثالث.

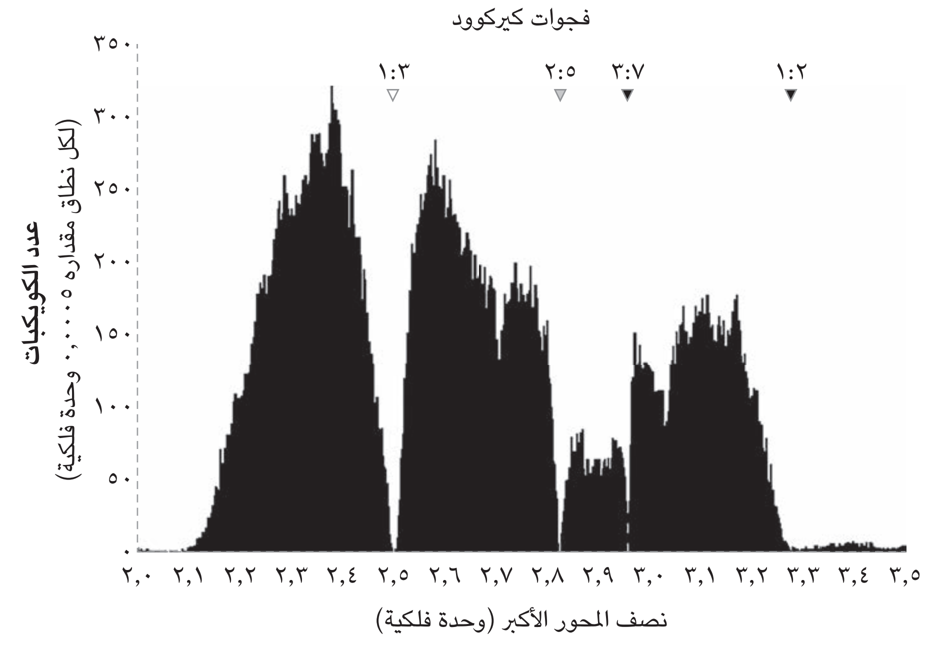
عام ١٨٦٦، لاحظ أحد الفلكيين الهواة، ويُدعى دانييل كيركوود، وجودَ فجواتٍ في حزام الكويكبات. لقد لاحظ تحديدًا أنَّ الكويكباتِ نادرًا ما تدور على مسافاتٍ محدَّدة

من الشمس، قياسًا على نصف القطر الأكبر في القطع الناقص المداري. توضِّح الصورة تخطيطًا حديثًا وأوسع نطاقًا لعدد الكويكبات الواقعة على مسافةٍ محدَّدة، في قلب الحزام، وتتراوَح هذه المسافة من ٢ إلى ٣٫٥ من الوحدات الفلكية. تظهر ثلاثة منخفضات حادة يصل عدد الكويكبات فيها إلى الصفر. يوجد منخفض آخر بالقرب من مسافة ٣٫٣ وحدات فلكية، لكنه لا يظهر بالدرجة نفسها من الوضوح بسبب وجود بضعة كويكبات متناثرة. تُعرف هذه المنخفضات باسم فجوات كيركوود.

ثمَّة سببان لعدم ظهور فجوات كيركوود في هذه الصورة. السبب الأول أنَّ وحدات البيكسل التي تُمثِّل الكويكبات كبيرةٌ مقارنة بحجم الكويكبات في مقياس الصورة، و«الفجوات» تحدث في المسافات لا الموقع. والسبب الثاني أنَّ كلًّا من الكويكبات يتبع مدارًا إهليلجيًّا، وتختلف مسافته من الشمس على امتداد المدار. ولهذا؛ فإنَّ الكويكبات «تعبر» الفجوات، كل ما هنالك أنها لا تمكث فيها وقتًا طويلًا. وتشير المحاور الكبرى لهذه المدارات الإهليلجية إلى العديد من الاتجاهات المختلفة. وهذه الآثار تجعل الفجوات مبهمة حتى إنه لا يمكن رؤيتها في صورة. غير أنك إذا رسمت المسافات، فإنها تظهر على الفور.

اقترح كيركوود على حق، أنَّ السبب في الفجوات هو مجال الجاذبية الضخم للمشتري. يؤثِّر هذا المجال في جميع كويكبات الحزام، لكن يوجد فارق بارز بين المدارات الرنينية والمدارات غير الرنينية. فالمنخفض الأكثر هبوطًا على يسار الصورة، يتناظر مع مسافة مدارية يدور الكويكب عندها برنين تبلغ نسبته ١:٣ مع المشتري. معنى هذا أنه يدور حول الشمس ثلاث دورات كاملة مقابل دورة واحدة للمشتري. وهذا الاصطفاف المتكرر يجعل التأثير الطويل المدى لجاذبية المشتري أكثر قوة. في هذه الحالة، تخلي مدارات الرنين مناطق من الحزام. تصبح مدارات الكويكبات التي تشترك في رنين مع المشتري أكثر استطالة وفوضوية، حتى إنها تعبر مدارات الكواكب الداخلية، لا سيما المريخ. وهذه الأحيان التي يقترب فيها مدارات الكويكبات من المريخ، تغيرها بدرجة أكبر، فتقذف بها في اتجاهات عشوائية. ولأنَّ هذا التأثير يتسبَّب في أن تفقد المنطقة القريبة من المدار الرنيني عددًا كبيرًا للغاية من الكويكبات، تتشكَّل الفجوات هناك.

توجد الفجوات الأساسية وما يناظرها من مدارات رنينية (بين الأقواس)، على المسافات التالية: ٢٫٠٦ وحدة فلكية (١:٤)، و٢٫٥ وحدة فلكية (١:٣)، و٢٫٨٢ وحدة فلكية (٢:٥)، و٢٫٩٥ وحدة فلكية (٣:٧)، و٣٫٢٧ وحدات فلكية (١:٢). وتوجد فجوات



فجوات كيركوود في حزام الكويكبات وما يرتبط بها من مدارات رنين مع المشتري.

أضعف أو أضيق على المسافات التالية: ١٫٩ وحدة فلكية (٢:٩) و٢٫٢٥ وحدة فلكية (٢:٧)، و٢٫٣٣ وحدة فلكية (٣:١٠)، ٢٫٧١ وحدة فلكية (٣:٨)، و٣٫٠٣ وحدات فلكية (٤:٩)، و٣٫٠٨ وحدات فلكية (٥:١١)، و٣٫٤٧ وحدات فلكية (٦:١١)، و٣٫٧ وحدات فلكية (٣:٥). ومن ثمَّ، فإنَّ مدارات الرنين تتحكم في توزيع أنصاف الأقطار الكبرى لدى الكويكبات.

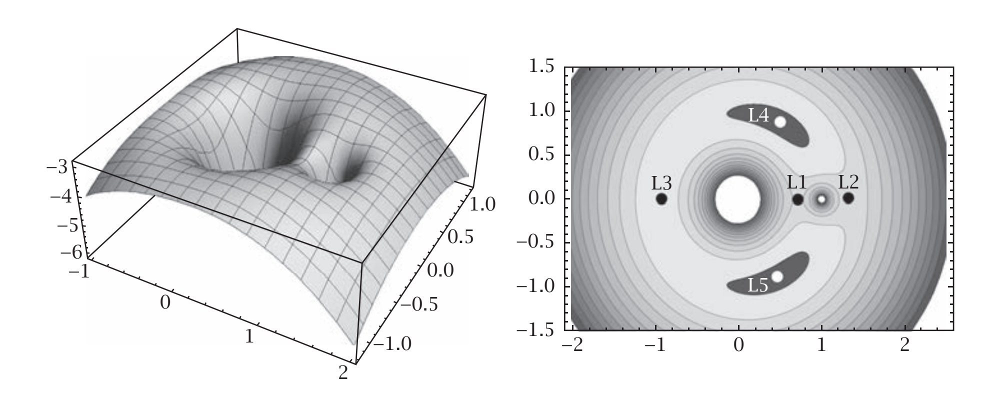
إضافةً إلى الفجوات، توجد تكتلات أيضًا. ننوِّه مرةً أخرى إلى أنَّ هذا المصطلح يعبِّر عادة عن تركيزات بالقرب من مسافة محددة، لا تجمعات موضعية فعلية من الكويكبات. بالرغم من ذلك، سوف نناقش تجمعين فعليين فيما بعد؛ تجمُّع جريك وتجمُّع تروجان. ذلك أنَّ مدارات الرنين تتسبب أحيانًا في تكوين تكتلات لا فجوات، ويتوقف ذلك على الأعداد التي ينطوي عليها الرنين، وعدد من العوامل الأخرى.[3]

بالرغم من الصعوبة الشديدة في التوصل إلى حل رياضي لمعضلة الأجسام الثلاثة؛ أي الكيفية التي تتحرك بها ثلاث نقاط من الكتلة تحت تأثير الجاذبية النيوتونية، فإنه يمكن الحصول على نتائج مفيدة بالتركيز على حلول مميزة. والأكثر أهمية من بينها، «معضلة الجسمين ونصف الجسم»، وهي مزحة رياضية تنطوي على نقطة جادة. في هذه الحالة، يكون للجسمين كتلتان غير صفريتين، ويكون الجسم الثالث ضئيلًا للغاية حتى إنَّ كتلته تقترب للغاية من الصفر بالفعل. ومن الأمثلة على ذلك شذرة غبار تتحرك تحت تأثير الأرض والقمر. تتمثَّل فكرة هذا النموذج في أنَّ شذرة الغبار تستجيب لقوى الجاذبية التي يبذلها كلٌّ من الأرض والقمر، لكنها خفيفة للغاية حتى إنها لا تبذل أي قوة على أيٍّ من الجسمين. يخبرنا قانون نيوتن للجاذبية أنَّ شذرة الغبار ستبذل قوة صغيرة للغاية، لكنها صغيرة جدًّا مما يسمح بتجاهلها في هذا النموذج. ومن الناحية العملية، ينطبق الأمر نفسه أيضًا على جسم أثقل، مثل قمر صغير أو كويكب، شرط أن يكون المقياس الزمني قصيرًا بما يكفي لاستبعاد أية تأثيرات فوضوية.

ثمَّة تبسيط إضافي أيضًا يتمثَّل في أنَّ الجسمين يدوران في مدارات دائرية. يسمح لنا هذا التبسيط بتحويل المسألة بأكملها إلى إطار مرجعي دوراني، يكون الجسمان الكبيران ثابتين بالنسبة إليه، ويقعان في مستوًى ثابت. تخيَّل قرصًا دوَّارًا ضخمًا. تخيَّل أنك تصل الأرض والقمر بالقرص الدوَّار بحيث يقعان على خط مستقيم يمر عبر المحور المركزي، على الجانبين المقابلين له. تبلغ كتلة الأرض ٨٠ ضعفًا تقريبًا من كتلة القمر؛ ولهذا إذا وضعنا القمر على مسافةٍ تبعد عن نقطة المحور بمقدار ٨٠ ضعفًا مما تبعده عنه الأرض، فسوف يتطابق مركز كتلة الجسمين مع نقطة المحور. وإذا كان القرص الدوَّار يدور الآن بالسرعة المناسبة تمامًا، حاملًا معه الأرض والقمر، فإنهما يتبعان مدارين دائريين يتفقان مع الجاذبية النيوتونية. وبالنسبة إلى نظام إحداثيات متصل بالقرص الدوار، يكون الجسمان ثابتين لكنهما يختبران الدوران على هيئة «قوة طرد مركزية». والحق أنها ليست قوة فيزيائية حقيقية؛ فهي تظهر لأنَّ الجسمين مثبتان بالقرص الدوار ولا يمكنهما الحركة في خطين مستقيمين. بالرغم من ذلك، فهي تبذل عليهما التأثير نفسه الذي تبذله قوة في نظام الإحداثيات ذاك. ولهذا السبب، غالبًا ما تُوصف بأنها «قوة وهمية»، بالرغم من أنَّ تأثيرها حقيقي.

في عام ١٧٦٥، أثبت أويلر أنه يمكن في نموذج كهذا، تثبيت شذرة غبار في نقطةٍ تقع على الخط المستقيم نفسه الذي يقع عليه الجسمان الآخران؛ فتتحرك الأجسام الثلاثة

كلها في مدارات دائرية تتفق مع جاذبية نيوتن. وفي نقطةٍ ما، تُلغى قوى الجاذبية التي يبذلها كلٌّ من الأرض والقمر بفعل قوة الطرد المركزية التي تختبرها شذرة الغبار. وقد وجد أويلر ثلاث نقاط كهذه بالفعل. تُدعى إحداها الآن بالنقطة L1 وهي تقع بين الأرض والقمر. والنقطة الثانية هي L2، وتقع على جانب القمر البعيد عن الأرض، أما النقطة الثالثة L3، فتقع على جانب الأرض البعيد عن القمر.



تصوير الجاذبية في معضلة الجسمين ونصف في إطار مرجعي دوراني. على اليسار: السطح. على اليمين: الخطوط الكنتورية.[4]

تستخدم هذه الرموز الحرف L بدلًا من E؛ لأنَّ لاجرانج اكتشف في عام ١٧٧٢ موقعين إضافيين محتملين لشذرة الغبار. لا يوجد هذان الموقعان على خط الأرض–القمر؛ بل على زاويتي المثلثين المتساويي الأضلاع، اللذين يكون زاويتاهما الأخريان هما الأرض والقمر. عند هاتين النقطتين، تظل شذرة الغبار ساكنة بالنسبة إلى الأرض والقمر. تقع نقطة لاجرانج L4 أمام القمر بمقدار ٦٠ درجة، وتقع النقطة L5 خلفه بمقدار ٦٠ درجة. أثبت لاجرانج وجود خمسٍ من مثل هذه النقاط لأي جسمين.

من الناحة التقنية، عادةً ما يكون نصفا قطرَي المدارين اللذَين يتناظران مع النقطتَين L4 وL5 مختلفين عن نصفي قطري مداري الجسمين الآخرين. غير أنه إذا كان أحد هذين الجسمين أضخم كثيرًا، كالشمس وأحد الكواكب على سبيل المثال، فإنَّ مركز الكتلة المشترك، والجسم الأضخم يتطابقان تقريبًا. ومن ثمَّ، يصبح المداران المتناظران مع النقطتين L4 وL5، كمداري الجسم الأقل كتلة تقريبًا.

يمكن التوصُّل إلى هندسة نقاط لاجرانج من طاقة شذرة الغبار. تتمثَّل هذه الطاقة في طاقتها الحركية بينما تدور مع القرص الدوار، زائد طاقات وضعها التجاذبية التي تتناظر مع جذب الشمس والقمر. توضِّح الصورة إجمالي طاقة شذرة الغبار بطريقتَين؛ على هيئة سطح منحنٍ يمثِّل ارتفاعه إجمالي الطاقة، وعلى هيئة نظامٍ من الخطوط المحيطية، وهي منحنيات تكون الطاقة ثابتة عليها. يمكنك تخيُّل السطح على أنه منظر أفقي للجاذبية. تتحرك شذرة الغبار على السطح، لكن إذا لم تؤدِّ قوةٌ ما إلى اضطراب هذه الحركة، فلا بد أن تبقى على خط محيطي واحد، مثلما يقضي بذلك حفظ الطاقة. يمكن أن تتحرك إلى الجانبين، لكنها لا تتحرك إلى أعلى أو أسفل.

إذا كان «الخط» المحيطي نقطة واحدة، فسوف تكون الشذرة في حالة اتزان؛ أي أنها ستبقى في المكان الذي تضعها فيه، بالنسبة إلى القرص الدوَّار. توجد نقاط خمس من هذا النوع، وهي موضحة على صورة الخطوط المحيطية بالأسماء من L1 إلى L5. عند النقاط L1 وL2 وL3، يتخذ السطح شكل السرج؛ إذ ينحني المسطح في بعض الاتجاهات إلى الأعلى، وينحني في بعضها الآخر إلى الأسفل. وعلى العكس من ذلك، نجد أنَّ النقطتَين L4 وL5، تمثِّلان قممًا في مسطح الطاقة. يتمثَّل الاختلاف المهم في أنَّ القمم (والوديان التي لا تحدث هنا) محاطة بخطوطٍ محيطيةٍ مغلقةٍ تبقى قريبةً للغاية من القمة نفسها. لكنَّ السروج مختلفة؛ فالخطوط المحيطية التي توجد بالقرب من نقاط السروج تنطلق مبتعدة، وبالرغم من أنها قد تنغلق في نهاية المطاف، فإنها تنحرف بمقدارٍ كبيرٍ في البداية.

إذا أُزيحَت شذرة الغبار من مكانها بدرجة طفيفة، فإنها تتحرك لمسافة قصيرة ثم تتبع أي خط محيطي تهبط عليه. إذا كانت النقطة سرجية، فإنَّ الخطوط المحيطية تأخذها بعيدًا عن الموقع الأصلي. إذا بدأت شذرة الغبار عند النقطة L2 على سبيل المثال وتحركت قليلًا إلى اليمين، فستهبط على خط محيطي مغلق ضخم يدور بها حول الأرض بالكامل، إلى أن تصل خارج L3 على الجانب البعيد. إذن، فنقاط الاتزان السرجية «غير مستقرة»؛ ذلك أنَّ الاضطراب المبدئي يزداد بدرجة كبيرة. أما القمم والوديان، فهي «مستقرة»؛ لأنَّ الخطوط المحيطية القريبة مغلقة و«تبقى» قريبة. فالاضطراب المبدئي الصغير يظل صغيرًا. لا تعود شذرة الغبار في حالة اتزان، لكنَّ حركتها الفعلية تجمع بين درجة صغيرة من التذبذب حول خط محيطي مغلق، والدوران الكلي حول القرص الدوار. تُعرف مثل هذه الحركة بمدار الشرغوف. النقطة الأساسية هي أن تبقى شذرة الغبار بالقرب من القمة.

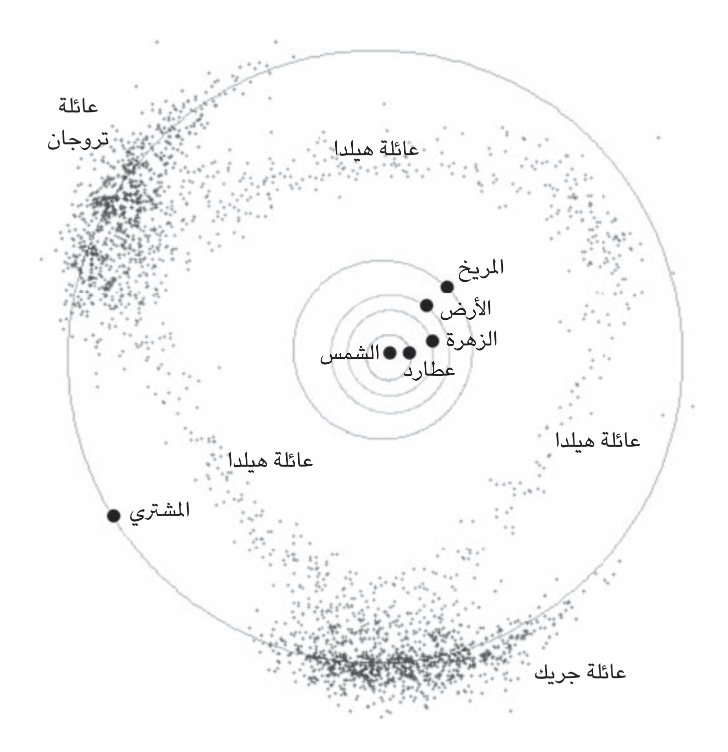
(لقد غششت بعض الشيء هنا؛ لأنَّ الصورة توضِّح المواقع ولا توضِّح السرعات المتجهة. فالتغيرات في السرعة المتجهة، تجعل الحركة الفعلية أكثر تعقيدًا، لكنَّ نتائج الاستقرار تظل سارية. انظر الفصل التاسع.)

تُعد نقاط لاجرانج سماتٍ مميزة في منظر الجاذبية، ويمكن استخدامها في التخطيط للبعثات الفضائية. ففي ثمانينيات القرن العشرين، ظهر اهتمام كبير ومفاجئ بمستعمرات الفضاء: مواطن اصطناعية ضخمة يعيش فيها البشر ويزرعون غذاءهم، وتعمل بطاقة الشمس. قد يتمكَّن البشر من العيش في باطن أسطوانة مجوفة إذا كانت تدور حول محورها، مما يشكِّل جاذبية اصطناعية عن طريق قوة الطرد المركزية. تُعد النقطة من نقاط لاجرانج موقعًا جاذبًا؛ لأنها تمثِّل حالة اتزان. حتى عند تلك النقاط السرجية غير المستقرة المتمثلة في L1 وL2 وL3، يمكن لانفجار بين الحين والآخر من محرك صاروخي أن يمنع الموطن من الانجراف بعيدًا. والقمتان L4 وL5 أفضل كثيرًا؛ إذ إنَّ ذلك التصحيح لا يلزم.

الطبيعة أيضًا تعرف بشأن نقاط لاجرانج، ذلك أنه توجد ترتيبات حقيقية مشابهة لتلك الترتيبات التي توصَّل إليها كلٌّ من أويلر ولاجرانج لكي تنجح نتائجهما. وكثيرًا ما تخالف هذه الأمثلة الحقيقية بعض شروط النموذج التقنية؛ فلا يلزم على سبيل المثال أن تقع شذرة الغبار على المستوى نفسه الذي يقع فيها الجسمان الآخران. فالسمات الأساسية لنقاط لاجرانج منيعة بعض الشيء، وتنطبق على أي شيء يشبه نموذجها المثالي بدرجة كافية.

يُعد المشتري هو المثال الأروع على هذا بمستعمراته الفضائية الخاصة: الكويكبات التي تُعرف باسم عائلة تروجان وعائلة جريك. تُرسم صورتها في زمن محدَّد في إطار مرجعي دوراني يتبع المشتري حول مداره. اكتشف ماكس فولف أول هذه الكويكبات، وهو أخيل ٥٨٨ عام ١٩٠٦. وفي عام ٢٠١٤ بلغ عدد كويكبات جريك التي نعرفها ٣٨٩٨، وبلغ عدد كويكبات تروجان ٢٠٤٩. يعتقد العلماء بوجود قرابة المليون من كويكبات جريك وتروجان التي يزيد قطرها عن الكيلومتر. تتخذ هذه الكويكبات أسماء تقليدية؛ فقد اقترح يوهان باليسا، الذي حسب الكثير من عناصرها المدارية، تسمية هذه الأجرام على أسماء المشاركين في حرب طروادة. تقع الغالبية العظمى من عائلة جريك بالقرب من النقطة L4، وتقع غالبية عائلة تروجان بالقرب من النقطة L5. بالرغم من

ذلك، يقع بتروكلوس الذي ينتمي إلى عائلة جريك بين عائلة تروجان، وتحيط عائلة جريك بهيكتور الذي ينتمي إلى عائلة تروجان. وبالرغم من أنَّ هذه الأجرام لا تشكل في الصورة سوى تجمعات صغيرة نسبيًّا، يعتقد علماء الفلك أنَّ عددها كبير بما يضاهي الكويكبات المعتادة.



تشكِّل كويكبات «جريك» و«تروجان» كتلات. وتشكل عائلة «هيلدا» مثلثًا مغبشًا متساوي الأضلاع، يقع اثنان من رءوسه عند النقطتين L4 وL5.

تتَّبع كويكبات جريك المدار نفسه الذي يتَّبعه المشتري تقريبًا، لكنها تسبقه بمقدار ٦٠ درجة، بينما تتخلف عنه كويكبات تروجان بمقدار ٦٠ درجة. ومثلما شرحنا في القسم السابق، فإنَّ المدارات لا تتطابق مع مدار المشتري تمامًا؛ بل هي قريبة منه فحسب. ثم إنَّ تقريب المدارات الدائرية التي تقع في المستوى نفسه غير واقعي؛ فالعديد من هذه

الكويكبات يميل إلى مدار الشمس بمقدار ٤٠ درجة. تبقى التكتلات مجمعة لأنَّ النقطتين L4 وL5 مستقرتان في نموذج الجسمين ونصف، ولأنَّ كتلة المشتري الضخمة تحافظ بدرجة كبيرة على استقرارهما في الديناميكيات الفعلية التي تتضمن أجسامًا متعددة، لأنَّ الاضطرابات التي تأتي من أماكن أخرى، لا سيما زحل، صغيرة نسبيًّا. بالرغم من ذلك، فقد يفقد أيٌّ من التكتلين بضعة كويكبات أو يكتسب بضعة منها.

ولأسباب مشابهة، يمكن أن نتوقَّع وجود تكتلات تروجان في كواكب أخرى (في المصطلحات العامة، تُعد كويكبات جريك لدى المشتري، من كويكبات تروجان بصورة شرفية). للزهرة كويكب مؤقت هو $2013\ ND_{15}$. وللأرض كويكب أكثر دوامًا هو تروجان $2010\ TK_7$ الذي يقع عند نقطة L4 الخاصة بها. للمريخ خمسة كويكبات، ولأورانوس كويكب واحد، أما نبتون، فله ١٢ كويكبًا على الأقل، وذلك أكثر من المشتري على الأرجح، ربما يكون العدد مساويًا لعشرة أضعافِ ما يوجد في المشتري.

وماذا عن زحل؟ لا نعرف بوجود أي من كويكبات تروجان هناك، غير أنَّ لديه قمرين ينتميان إلى عائلة تروجان، ولم يُكتشَف سواهما. يدور بقمره تثيس، اثنان من أقمار تروجان هما تيليستو وكاليبسو. ثمَّة قمر آخر أيضًا من أقمار زحل، ديون، يدور به اثنان من أقمار تروجان هما هيلين وبوليديوكيس.

ترتبط أقمار تروجان المشتريَّة ارتباطًا وثيقًا بعائلة مذهلة أخرى من الكويكبات، هي عائلة هيلدا. توجد هذه الكويكبات في حالة رنين مع المشتري بنسبة ٣:٢، وحين يكون الإطار دورانيًّا تشغل منطقة تتخذ شكلًا يشبه مثلثًا متساوي الأضلاع يقع اثنان من رءوسه عند النقطتين L4 وL5، بينما تقع نقطة أخرى في مدار المشتري الذي يعاكس مدار الكوكب تمامًا. «تدور» عائلة هيلدا ببطء بالنسبة إلى عائلة تروجان والمشتري.[5] وعلى العكس من معظم الكويكبات، تتسم مداراتها بالانحراف المركزي. اقترح فريد فرانكلين أنَّ المدارات الحالية توفِّر دليلًا إضافيًّا على أنَّ المشتري قد تشكَّل في الأصل على مسافة تبعد عن الشمس بمقدار ١٠٪ إضافية، ثم تحرك إلى الداخل.[6] فالكويكبات التي تقع على تلك المسافة وتدور في مدارات دائرية، كانت ستبتعد أو تتخذ مدارات لها درجة أكبر من الانحراف المركزي.[7]

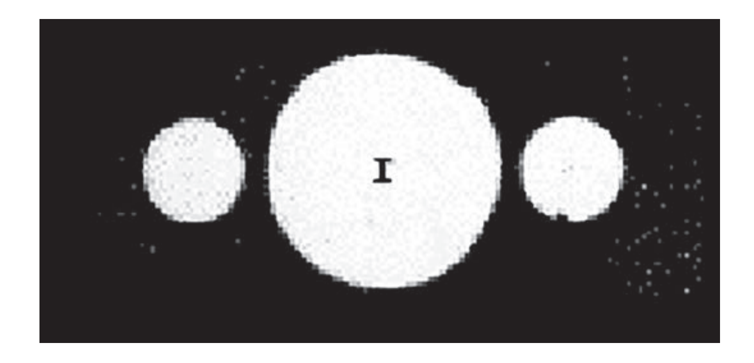
الفصل السادس

الكوكب الذي ابتلع أطفاله

«إنَّ نجم زحل ليس نجمًا مفردًا، وإنما يتركَّب من ثلاثةٍ يكاد يلمس بعضها بعضًا، لا تتغير أبدًا بالنسبة إلى بعضها البعض أو تتحرك، وهي تترتَّب في صف على دائرة البروج، ويبلغ حجم الأوسط منها ثلاثة أضعاف الطرفين؛ فتجدها تتخذ هذه الصورة: oOo.»

جاليليو جاليلي، «رسالة إلى كوزيمو دي ميديشي»،
٣٠ يوليو ١٦١٠

حين وجَّه جاليليو تلسكوبه إلى زحل لأول مرة، ورسم ما رآه، بدا على هذا النحو:



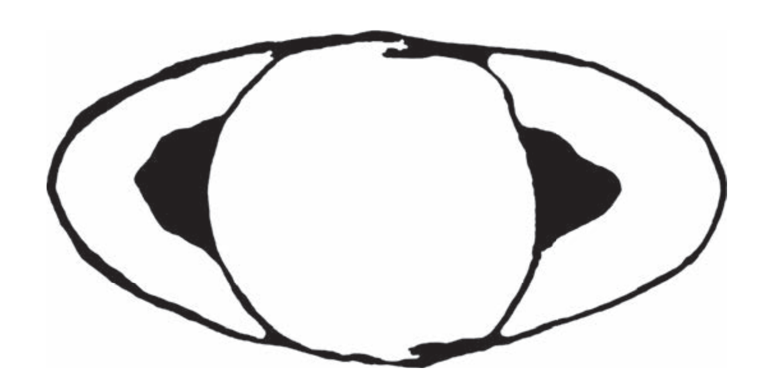
رسمة جاليليو لزحل عام ١٦١٠.

يمكنك أن تفهم السبب الذي دفعه لوصفه بالشكل oOo في خطابه المتحمس إلى راعيه كوزيمو دي ميديشي. لقد بعث بنبأ اكتشافه إلى كيبلر، لكنه أرسله في صورة جناس

تصحيفي *smaismrmilmepoetaleumibunenugttauiras*، مثلما كان شائعًا في ذلك الوقت. ذلك أنه إذا توصَّل أحد إلى الاكتشاف نفسه لاحقًا، كان سيصبح بمقدور جاليليو المطالبة بالأولوية لنفسه من خلال فك شفرة الجناس التصحيفي إلى *Altissimum planetam tergeminum observavi*: «لقد رصدت أنَّ أبعد الكواكب له نظام ثلاثي.»

من سوء الحظ أنَّ كيبلر فك شفرة الرسالة على أنها: *salve umbistineum geminatum Martia proles*: «أحييك، قبضة مزدوجة، أبناء المريخ.» أي للمريخ قمران. كان كيبلر قد تنبأ بهذا بالفعل على أساس أنَّ المشتري له قمران، وللأرض قمرًا واحدًا؛ لذا فلا بد أن يكون لما بينهما قمران؛ لأنَّ ١، ٢، ٤، تسلسل هندسي. وكان من المفترض أن يكون لزحل ثمانية أقمار. والزهرة، أيكون له نصف قمر؟ لقد كانت قدرة كيبلر على رؤية الأنماط متكلَّفة بعض الشيء. غير أنني سأسحب تهكمي؛ لأنه، وبأعجوبة، للمريخ قمران «بالفعل»؛ فوبوس وديموس.

حين نظر جاليليو مجددًا عام ١٦١٦، أدرك أنَّ تلسكوبه البدائي قد خدعه بصورة باهتة أوَّلها على أنها ثلاثة أقراص. غير أنَّ الأمر كان لا يزال محيرًا. كتب جاليليو أنَّ زحل يبدو وكأنه يمتلك أذنين.



رسم جاليليو جاليلي لزحل عام ١٦١٦.

بعد ذلك ببضعة أعوام، نظر مجددًا ووجد أنَّ الآذان أو الأقمار أو أيًّا ما كان ذلك الذي رآه، قد اختفى. تساءل جاليليو ببعض المزاح عمَّا إذا كان زحل قد ابتلع أطفاله. كانت تلك إشارية غير مباشرة إلى أسطورة يونانية دموية يرتعب فيها الجبار كرونوس

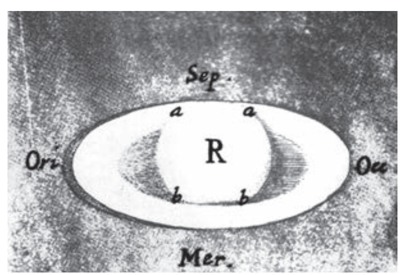
من أن يطيح أحد أبنائه به من على العرش، فيأكل كل واحد منهم حين يولَد. والمكافئ الروماني لكرونوس هو «ساترن» (زحل).

حين عادت الآذان، كان جاليليو أكثر دهشة.

إننا نعرف الآن بالطبع حقيقة ملاحظات جاليليو. وهي أنَّ زحل محاط بنظام ضخم من الحلقات الدائرية. تميل هذه الحلقات بالنسبة إلى مدار الشمس؛ ولهذا حين يدور زحل حول الشمس نرى «الوجه الكامل» للحلقات، وهي تبدو أكبر من الكوكب في بعض الأحيان، كما يبدو في رسمة «الآذان». وفي أحيان أخرى، نراها من الحافة وهي تختفي تمامًا ما لم نستخدم تلسكوبًا أفضل كثيرًا من تلسكوب جاليليو.

إنَّ هذه الحقيقة وحدها تخبرنا بأنَّ الحلقات رفيعة للغاية مقارنةً بالكوكب، لكننا نعرف الآن أنها رفيعة للغاية بالتأكيد؛ فهي لا تزيد عن ٢٠ مترًا. أما قطرها في المقابل، فهو يبلغ ٣٦٠ ألف كيلومتر. إذا كانت حلقات زحل في سمك البيتزا، فإنها ستكون في حجم سويسرا. لم يكن جاليليو يعرف أيًّا من هذا. غير أنه عرف أنَّ زحل غريب وغامض ويختلف كثيرًا عن أي كوكب آخر.

استخدم كريستيان هوجنس تلسكوبًا أفضل، وكتب عام ١٦٥٥ أنَّ زحل «محاط بحلقة مسطحة رفيعة لا تتلامس معه في أي مكان، وتميل على مدار الشمس». ورصد هوك وجود ظلال للكوكب أمام الحلقة، وللحلقة أمام الكوكب أيضًا، مما يوضِّح الهندسة الثلاثية الأبعاد من خلال توضيح أيهما يكمن أمام الآخر.





على اليسار: رسمة هوك عام ١٦٦٦ لكوكب زحل، وتظهر فيها الظلال. على اليمين: صورة حديثة توضح حاجز كاسيني، وهو فجوة معتمة بارزة في الحلقات.

أتكون حلقات زحل مصمتة كحافة قبعة، أم أنها تتكوَّن من عددٍ لا يُحصى من كتل ضئيلة صخرية أو جليدية؟ ممَّ تتكوَّن إذا كانت متواصلة؟ ولماذا تبدو صلدة لا يتغير شكلها إذا لم تكن متواصلة؟

أتت الإجابات تدريجيًّا في مزيج من الملاحظات والتحليل الرياضي.

رأى الراصدون الأوائل حلقة واحدة واسعة. غير أنه في عام ١٦٧٥، توصَّل جيوفاني كاسيني إلى درجة أفضل من الرصد كشفت عن عدد من الفجوات الدائرية تقسم الحلقة بأكملها إلى مجموعة من الحلقات الفرعية المتحدة المركز. تُعرف الفجوة الأبرز من بينها باسم حاجز كاسيني. وتُعرف الحلقة الأبعد إلى الداخل باسم الحلقة B، بينما تُعرف الحلقة الأقرب إلى الخارج باسم الحلقة A. عرف كاسيني أيضًا حلقة أكثر شحوبًا توجد داخل الحلقة A، وسُمِّيت بالحلقة C. لقد عمَّقت هذه الاكتشافات من اللغز، لكنها مهَّدت الطريق لحله النهائي.

أشار لابلاس في عام ١٧٨٧ إلى وجود مشكلة ديناميكية في الحلقة المصمتة الواسعة. فقانون كيبلر الثالث يخبرنا بأنه كلما زاد بُعد الجِرم عن مركز الكوكب، قلَّت سرعته في الدوران. غير أنَّ الحافتين الداخلية والخارجية في الحلقة المصمتة تدوران بالسرعة الزاوية نفسها. ومن ثمَّ؛ فإما أن تكون الحافة الخارجية تتحرك سريعًا جدًّا، أو تكون الحافة الداخلية تتحرك بطيئًا جدًّا، أو ربما يحدث الأمران معًا. يشكِّل هذا التباين إجهادًا في مادة الحلقة؛ لذا فسوف تتفكك ما لم تكن مكوَّنة من مادة قوية للغاية. وقد كان حل لابلاس لهذه المعضلة أنيقًا؛ فقد اقترح أنَّ الحلقات تتكوَّن من حليقات ضيقة للغاية تتلاءم الواحدة منها داخل الحلقة التالية. وبالرغم من أنَّ الحليقات جميعها مصمتة، فإنَّ سرعاتها في الدوران تتناقص مع كِبَر أنصاف أقطارها. تملَّص هذا الحل بأناقة من معضلة الإجهاد؛ لأنَّ الحافتين الداخلية والخارجية في حلقة ضيقة تدوران بالسرعة نفسها تقريبًا.

حلٌّ أنيق لكنه خاطئ. ففي عام ١٨٥٩، أثبت الفيزيائي الرياضي جيمس كليرك ماكسويل، أنَّ الحليقة المصمتة الدوَّارة ستكون غير مستقرة. لقد حل لابلاس معضلة الإجهاد الذي يسببه دوران الحواف بسرعات مختلفة، لكنَّ هذا الإجهاد من نوع «المقص»، كتلك القوى التي تحدث بين بطاقات في علبة إذا حاولت تحريك البطاقات جانبيًّا مع إبقائها في كومة. غير أنَّ أنواعًا أخرى من الإجهاد يمكن أن تحدث أيضًا، كثني البطاقات على سبيل المثال. أثبت ماكسويل أنَّ أي اضطراب طفيف يحدث في حليقة مصمتة بفعل

مصادر خارجية، ينمو مؤدِّيًا بالحليقة إلى التموج والانثناء، فتتكسر مثلما ينكسر عود من الإسباجيتي فور أن تحاول ثنيه.

استنتج ماكسويل أنَّ حلقات زحل لا بد أن تكون مؤلفة من عدد لا يُحصى من الأجسام الضئيلة التي تتحرك كلها في دوائر بصفة مستقلة، وبأي سرعة تتوافق رياضيًّا مع شدة الجاذبية المبذولة عليها. (ظهرت حديثًا بعض المشكلات في هذا النموذج المبسط: انظر الفصل الثامن عشر. لا تزال النتيجة المترتبة على نماذج الحلقات غير واضحة. وسوف أرجئ التوسع في المناقشة إلى ذلك الفصل، وأذكر النتائج المتفق عليها هنا.)

نظرًا لأنَّ كل شيء يتحرك في دوائر، يتسم البناء كله بالتناظر الدوراني؛ لذا تتوقَّف سرعة الجسيم على المسافة التي يبعدها عن المركز فحسب. وبافتراض أنَّ كتلة المادة التي تتكوَّن منها الحلقة لا تُذكر مقارنةً بكتلة زحل وهو الأمر الذي نعرفه، فإنَّ قانون كيبلر الثالث يؤدي إلى صيغة بسيطة. سرعة جسيم حلقي بالكيلومتر في الثانية يساوي ٢٩٫٤ مقسومًا على الجذر التربيعي لنصف قطره المداري، ويُقاس بصفته من مضاعفات نصف قطر زحل.

وبدلًا من ذلك، يمكن أن تكون الحلقات سائلة. غير أنه في العام ١٨٧٤ أثبتت صوفيا كوفاليفسكايا، وهي واحدة من أعظم عالمات الرياضيات، أنَّ الحلقة السائلة ستكون غير مستقرة هي أيضًا.

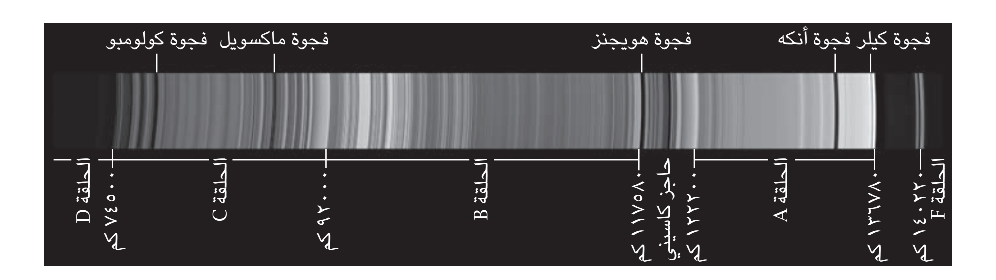
بحلول العام ١٨٩٥، صدر حكم علماء الفلك بناءً على الملاحظات الرصدية. تتكوَّن حلقات زحل من عددٍ هائل من الأجسام الصغيرة. وأدت المزيد من الملاحظات الرصدية إلى اكتشاف العديد من الحلقات الفرعية الجديدة الأكثر شحوبًا، وقد سُمِّيت على نحوٍ مبتكر بالأسماء: D وE وF وG. وقد مُنِحت هذه الأسماء وفقًا لتاريخ اكتشافها وترتيبها المكاني، وسيكون ترتيبها بدايةً من الكوكب إلى الخارج على النحو التالي: DCBAFGE. ليست فوضوية بقدر جناس جاليليو التصحيفي، لكنها تقترب من ذلك.

ما من خطة عسكرية تبقى على حالها عند الالتحام مع العدو. وما من نظرية فلكية تبقى على حالها عند التوصل إلى ملاحظات أفضل.

في عام ١٩٧٧، أرسلت ناسا مسبارين فضائيين هما «فوياجر ١» و«فوياجر ٢»، في رحلة كبيرة للكواكب. من حسن الحظ أنَّ كواكب النظام الشمسي قد اصطفت؛ فصار من الممكن زيارة الكواكب الخارجية بالترتيب. زار مسبار «فوياجر ١» المشتري وزحل،

ومرَّ «فوياجر ٢» بأورانوس ونبتون. تابع المسباران رحلاتهما، متوجهين إلى الفضاء بين النجمي، الذي يُعرَّف بأنه المنطقة التي تقع فيما وراء حافة الغلاف الشمسي؛ حيث تخفت الرياح الشمسية. إذن، فمعنى «بين النجمي» أنَّه لا يعود للشمس أي تأثير مهم سوى شدة جاذبية ضعيفة للغاية. وصل «فوياجر ١» منطقة العبور هذه عام ٢٠١٢، ومن المتوقع أن يصلها «فوياجر ٢» عام ٢٠١٦. ويستمر المسباران في إرسال البيانات للأرض. لا بد أنهما أنجح بعثتين فضائيتين على الإطلاق.

في أواخر ثمانينيات القرن العشرين تغيرت أفكار الإنسانية عن زحل إلى الأبد حين بدأ «فوياجر ١» في إرسال صور للحلقات قبل ستة أسابيع من وصوله إلى أقرب نقطة له من الكوكب. وأوضحت تفاصيل دقيقة لم تُرَ من قبلُ أنه يوجد المئات، إن لم يكن الآلاف، من الحلقات المنفصلة التي تتوزع على مسافة قريبة للغاية بعضها من بعض، مثلما تتوزع الأخاديد على تسجيل جرامافون قديم. لم يكن هذا الأمر في حد ذاته بالمفاجأة الكبيرة، لكنَّ ثمَّة سمات أخرى لم تكن متوقعة، وحيَّرت العلماء في بادئ الأمر. فقد كان العديد من العلماء النظريين يتوقَّعون أن تتوافق السمات الأساسية للنظام الحلقي بالرنين مع أقمار الكوكب (المعروفة) الأقرب إلى الداخل، غير أنها لا تفعل في مجمل الأمر. وقد اتضح أيضًا أنَّ حاجز كاسيني ليس فارغًا؛ بل توجد به أربع حلقات رفيعة على الأقل.



الصور من (اليسار إلى اليمين) لحلقات زحل: D وC وB وA وF، مثلما التقطتها مركبة كاسيني عام ٢٠٠٧.

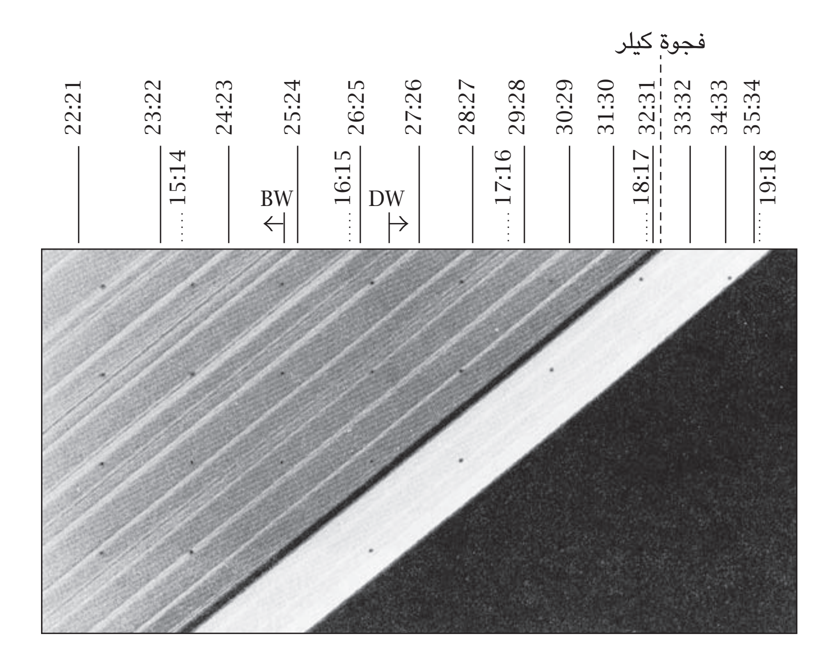
لاحظ ريتش تيريل، وهو أحد العلماء الذين كانوا يعالجون الصور، أمرًا غير متوقَّع على الإطلاق: ظلال معتمة تشبه أسلاك عجلة مغبشة تدور. لم يرَ أحد من قبل في الحلقات

أي شيء لا يتسم بالتناظر الدائري. وقد كشف التحليل الدقيق لأنصاف أقطار الحلقات عن لغز آخر، وهو أنَّ إحدى الحلقات ليست دائرية.

جاء بعد ذلك «فوياجر ٢» الذي كان قد انطلق قبل «فوياجر ١» لكنه كان يتحرك على نحوٍ أبطأ كي يُتاح له الاستمرار حتى أورانوس ونبتون، ليؤكد على هذه المشاهدات حين مر بزحل بعد ذلك بتسعة شهور. ومع تدفُّق المزيد والمزيد من المعلومات، ظهر المزيد من الألغاز. ثمَّة حلقات تبدو مضفرة، وحلقات بها عقد غريبة، وحلقات غير مكتملة تتكوَّن من عدة أقواس منفصلة توجد فراغات فيما بينها. وُجِدت أقمار زحل التي لم تكن مُكتشَفة من قبل، داخل الحلقات. قبل لقاءات «فوياجر» كان علماء الفلك المقيدون بالأرض قد اكتشفوا تسعة أقمار لزحل. وخلال فترة قصيرة، ارتفع العدد إلى أكثر من ٣٠. واليوم، وصل إلى ٦٢ إضافةً إلى ١٠٠ أو أكثر من القميرات الصغيرة التي تقبع في الحلقات. من بين هذه الأقمار، يوجد الآن ٥٣ يتخذ أسماءً رسمية. إنَّ مسبار «كاسيني» الذي يدور بزحل، يقدِّم سيلًا من البيانات عن الكوكب وحلقاته وأقماره.

تفسِّر الأقمار بعض سمات الحلقات. فالمؤثر الأساسي للجاذبية على الجسيمات الموجودة في الحلقات هو زحل نفسه. وما يأتي بعد ذلك في ترتيب الأهمية هي قوى الجاذبية التي يبذلها العديد من الأقمار، لا سيما تلك الأقمار القريبة. ولهذا، فبالرغم من سمات الحلقات قد تبدو غير ذات صلة بالأقمار «الأساسية»، يمكن أن نتوقَّع أن تكون متصلة بأقمار أصغر لكن أقرب. يتضح هذا التنبؤ الرياضي على نحوٍ مذهل في البنية الدقيقة للمنطقة الخارجية من الحلقة A. تحدث كل سمة بصورة فعلية على مسافة تتناظر مع رنين للقمرين باندورا وبروميثيوس، اللذين يقعان على جانبي الحلقة F القريبة، وتلك علاقة سنعود إليها بعد قليل. ولأسباب رياضية، تنطوي علاقات الرنين وثيقة الصلة على عددين صحيحين متتاليين، مثل ٢٨ : ٢٧.

يوضح الرسم الحافة الخارجية للحلقة A، والخطوط البيضاء المائلة هي المناطق التي تكون كثافة الجسيمات فيها أكبر من المتوسط. وتميز الخطوط الرأسية تلك المدارات ذات علاقات الرنين المتناظرة؛ حيث يمثِّل الخط المُنقَّط الرنين مع باندورا، ويمثِّل الخط المتصل الرنين مع بروميثيوس. وبصفة أساسية، تمثِّل جميع الخطوط البارزة مدارات رنينية. يتضح في الصورة أيضًا موقعان لموجة انثناء حلزونية، وموجة كثافة حلزونية تتناظران مع قمر آخر يُدعى ميماس برنين تبلغ نسبته ٨ : ٥.



الجزء الخارجي للحلقة A، يوضح سمات ترتبط بالرنين مع باندورا (الخطوط المُنقَّطة) ومع بروميثيوس (الخطوط المتواصلة). شبكة النقاط ناتجة عن عملية التصوير.

إنَّ الحلقة F ضيقة للغاية، وهو أمر محير؛ لأنَّ الحلقات الضيقة إن تُرِكَت لحالها دون تدخُّل، تكون غير مستقرة وتتسع ببطء. يضم التفسير الحالي باندورا وبروميثيوس، لكن بعض السمات لا تزال غير مرضية.

ظهرت هذه المشكلة لأول مرة فيما يتعلق بكوكب آخر هو أورانوس. لقد ظل زحل حتى وقت قريب هو الكوكب الوحيد في النظام الشمسي (أو أي مكان آخر)، المعروف بامتلاكه لنظام من الحلقات. غير أنه في العام ١٩٧٧، كان جيمس إليوت وإدوارد دانهام وجيسيكا مينك، يرصدون بعض الملاحظات باستخدام مرصد كايبر المحمول، وهو عبارة عن طائرة نقل مزودة بتلسكوب وغير ذلك من الأجهزة. كانت نيتهم هي معرفة المزيد بشأن الغلاف الجوي لأورانوس.

بينما يتحرك الكوكب في مداره، يمر في بعض الأحيان أمام نجم، فيغطي جزءًا من ضوئه في حدثٍ يُعرف بالاحتجاب. ومن خلال قياس خَرج الضوء الظاهر من النجم عندما

يخفت ويسطع، يتمكَّن علماء الفلك من الحصول على بعض المعلومات عن الغلاف الجوي للكوكب بقياس منحنى الضوء؛ أي كيفية تغيُّر مقدار من الضوء (يتكون من أطوال موجية متعددة). وفي عام ١٩٧٧، حدث احتجاب للنجم SAO 158687 بفعل أورانوس، وهذا هو ما خطَّط إليوت ودانهام ومينك لملاحظته. لا يقدِّم هذا الأسلوب معلومات عن الغلاف الجوي فحسب؛ بل عن أي شيء يدور بالكوكب، إن حدث وحجب النجم. وقد أظهر منحنى الضوء سلسلة من خمس ومضات ضئيلة قبل الحدث الأساسي حين صار النجم أكثر خفوتًا بدرجة كبيرة، وسلسلة من خمس ومضات متطابقة حين مرَّ أورانوس أمامه. قد يكون السبب في مثل هذه الومضة قمرًا ضئيلًا، بشرط أن تحدث في الوقت نفسه تحديدًا والموقع نفسه مرتين. أما الحلقة، فسوف تمر بالنجم بأكمله، فلا يلزم التزامن للتأثير في منحنى الضوء. ولهذا، فقد كان التفسير الأكثر منطقية للبيانات هو أنَّ أورانوس لديه خمس حلقات رفيعة للغاية وباهتة.

حين التقى مسبارا «فوياجر» بأورانوس، أكَّدا هذه النظرية برصد الحلقات مباشرة. (يبلغ عدد الحلقات المعروفة الآن ١٣ حلقة.) أوضح المسباران أيضًا أنَّ عرض الحلقات لا يتسع إلى أكثر من ١٠ كيلومترات. تبدو بذلك ضيقة على نحوٍ لافت للنظر؛ ذلك أنَّ الحلقات الرفيعة غير مستقرة مثلما أشرنا من قبل، وهي تتسع ببطء مع مرور الوقت. ومن خلال فهم الآلية التي تؤدي إلى هذا الاتساع، يمكن تقدير العمر المحتمل لحلقة رفيعة. يتضح من ذلك أنَّ حلقات أورانوس لن تبقى أكثر من ٢٥٠٠ عام. ربما تكوَّنت الحلقات قبل أقل من ٢٥٠٠ عام، لكن يبدو من غير المرجَّح على الإطلاق أن تتكوَّن تسع حلقات على فترات زمنية متقاربة للغاية. ثمَّة احتمال بديل يتمثَّل في وجود عامل آخر يؤدي إلى استقرار الحلقات ويمنعها من الاتساع. وفي عام ١٩٧٩، اقترح كلٌّ من بيتر جولدرايش وسكوت تريمين[1] آلية مميزة لتحقيق ذلك بالضبط: الأقمار الراعية.

تخيل أنَّه يتصادف وقوع الحلقة الضيقة المعنية داخل مدار قمر صغير. وفقًا لقانون كيبلر الثالث، يدور القمر حول الكوكب بدرجة أبطأ قليلًا من تلك التي تدور بها الحافة الخارجية للحلقة. توضح الحسابات أنَّ هذا يؤدي إلى أن يتسم المدار الإهليلجي للجسيم الحلقي بدرجة أقل من الانحراف المركزي، أي يصبح أسمن، ومن ثمَّ تقل المسافة القصوى التي يبعدها عن الكوكب بدرجةٍ طفيفة. يبدو الأمر كما لو أنَّ القمر يُبعد الحلقة، لكنَّ التأثير ينتج في الواقع عن قوى الجاذبية التي تبطئ جسيمات الحلقة.

يبدو هذا جيدًا جدًّا لكنَّ مثل ذلك القمر يؤدي أيضًا إلى اضطراب بقية الحلقة، لا سيما حافتها الداخلية. الحل: إضافة قمر آخر يدور داخل الحلقة. يكون لهذا تأثير

مشابه على الحافة الداخلية، لكنَّ القمر يدور الآن بأسرع مما تدور الحلقة. ولهذا، فهما يتحركان بعيدًا عن الكوكب، ومرةً أخرى يبدو الأمر كأنَّ القمر يُبعد الحلقة.

إذا حُشِرت حلقة رفيعة بين قمرين صغيرين، فإنَّ هذه التأثيرات تجتمع لتبقيها محشورة بين مداريهما. يلغي هذا أي نزعة أخرى كانت ستؤدي إلى اتساعها. تُعرف مثل هذه الأقمار بالأقمار الراعية؛ لأنها تبقي الحلقة في مسارها مثلما يسيطر الراعي على قطيعه من الأغنام. ربما كان مصطلح «أقمار كلاب الراعي» سيصبح تشبيهًا أفضل، لكنَّ الفعل «يرعى» يصف ما تفعله الأقمار. يوضح التحليل الأكثر تفصيلًا أنَّ جزء الحلقة الذي يتخلف وراء القمر الداخلي وأمام القمر الخارجي، سيكتسب تموجات، لكنها تموت نتيجة للاصطدام بين الجسيمات الحلقية.

حين وصل مسبار «فوياجر ٢» إلى أورانوس، أوضحت إحدى صوره أنَّ حلقة أورانوس التي تُسمى ε، تقع بعناية بين مداري قمرين هما أوفيليا وكورديليا. (تُسمى حلقات أورانوس بالحروف اليونانية الصغيرة، ويرمز ε إلى الحرف إبسلون.) وبهذا فقد سُوِّغَت نظرية جولدرايش وتريمين. يتعلق الأمر بالمدارات الرنينية أيضًا. فالحافة الخارجية من حلقة أروانوس ε، تتناظر مع أوفيليا في رنين تبلغ نسبته ١٣:١٤، وتتناظر الحافة الداخلية مع كورديليا في رنين تبلغ نسبته ٢٤:٢٥.

وعلى نحو مشابه، تقع الحلقة F لأورانوس بين مداري بندورا وبروميثيوس، ويُعتقد أنَّ هذا هو المثال الثاني على الأقمار الراعية. غير أنه توجد بعض التعقيدات؛ إذ إنَّ الحلقة F ديناميكية على نحوٍ مدهش. تظهر الحلقة F في الصور التي التقطها «فوياجر ١» في نوفمبر ١٩٨٠، بتكتلات وعقد ويبدو جزء منها مضفرًا. وحين مرَّ «فوياجر ٢» في أغسطس ١٩٨١، لم يُرَ من هذه السمات إلا جزء يشبه الضفيرة. يُعتقد الآن أنَّ السمات الأخرى قد اختفت فيما بين المرتين، مما يدل على إمكانية حدوث تغييرات في شكل الحلقة F في غضون بضعة شهور.

يقترح العلماء أنَّ هذه الآثار الديناميكية العابرة هي أيضًا تحدث بفعل باندورا وبروميثيوس. فالموجات التي تتولَّد نتيجة لاقتراب الأقمار الشديد لا تتلاشى؛ لذا تظل بعض بقاياها حتى المرة التالية لمرور القمر. وهذا يجعل ديناميكيات الحلقة أكثر تعقيدًا، وهو ما يعني أيضًا أنَّ التفسير المنمَّق المتمثِّل في أنَّ الأقمار الراعية هي ما يبقي على الحلقات الضيقة في مكانها، تبسيطي للغاية. ثم إنَّ مدار بروميثيوس فوضوي بسبب اقترانه مع باندورا في رنين تبلغ نسبته ١١٨:١٢١، لكنَّ بروميثيوس وحده يساهم في

تقييد الحلقة F. ولهذا، بالرغم من أنَّ نظرية الأقمار الراعية توفِّر بعض الرؤى بشأن ضيق الحلقة F، فإنها لا تمثل القصة بأكملها.

ووفقًا للأدلة اللاحقة، لا تتناظر الحافتان الداخلية والخارجية للحلقة F مع أية مدارات رنينية. والواقع أنَّ أقوى المدارات الرنينية بالقرب من الحلقة F، تتعلَّق بقمرين مختلفين تمامًا، هما جانوس وإيبيميثيوس. يتسم هذان القمران بسلوك غريب للغاية؛ فهما مشتركان مداريًّا. إنَّ المعنى الحرفي لهذا المصطلح هو أنهما «يتشاركان المدار نفسه» وهما يفعلان ذلك من ناحيةٍ ما. ففي معظم الأحيان، يكون مدار أحدهما أكبر من مدار الآخر ببضعة كيلومترات. ولأنَّ القمر الأبعد إلى الداخل يتحرك بسرعة أكبر، فإنه سيصطدم بالقمر الأبعد إلى الخارج إذا التزما بمداريهما الإهليلجيين. لذا فهما يتفاعلان بدلًا من ذلك، و«يتبادلان مكانيهما». يحدث هذا كل أربع سنوات. ولهذا السبب وصفتهما بـ «الأبعد إلى الداخل» و«الأبعد إلى الخارج». ذلك أنَّ الوصف الذي يتخذه كلٌّ منهما يتوقف على التاريخ.

إنَّ هذا النوع من التبديل يختلف اختلافًا كبيرًا عن القطوع الناقصة المنضبطة التي تصورها كيبلر. وهو يحدث لأنَّ القطوع الناقصة هي المدارات الطبيعية لديناميكيات «جسمين». وحين يدخل جسم ثالث إلى الصورة، تتخذ المدارات أشكالًا جديدة. في هذه الحالة التي نناقشها، يُعد تأثير الجسم الثالث صغيرًا في الغالب بما يكفي لتجاهله؛ لذا يتحرك كلٌّ من القمرين في مدار على شكل القطع الناقص بدرجة كبيرة، كما لو أنَّ القمر الآخر غير موجود. غير أنهما حين يقترب أحدهما من الآخر، تفشل هذه الحيلة التقريبية. فهما يتفاعلان، ويتأرجحان أحدهما حول الآخر في هذه الحالة، حتى ينتقل كل قمر إلى المدار السابق للقمر الآخر. ومن ناحيةٍ ما، يمكن وصف المدار الفعلي لكل قمر بأنه قطع ناقص واحد يتبدل مع الآخر، مع مسارات انتقالية قصيرة بين الاثنين. يتبع كلا المدارين مثل ذلك المدار، بناءً على القطعين الناقصين نفسيهما. كلُّ ما في الأمر أنهما ينتقلان إلى اتجاهين متقابلين في الوقت نفسه.

يعرف البشر بوجود حلقات زحل منذ عصر جاليليو، وإن كان غير متأكد بشأن ماهيتها. وعرف البشر بوجود حلقات أورانوس عام ١٩٧٩. ونحن نعرف الآن بوجود نظامين حلقيين باهتين للغاية حول المشتري ونبتون. ومن المحتمل أيضًا أن يكون لقمر زحل، ريا، نظامه الحلقي الخاص الرقيق للغاية.

علاوةً على ذلك، اكتشف كلٌّ من دوجلاس هاميلتون ومايكل سكروتسكي في عام ٢٠٠٩، أنَّ زحل يمتلك حلقة ضخمة للغاية لكنها باهتة جدًّا، وهي أكبر من الحلقات التي رصدها جاليليو ومسبارا «فوياجر». لقد غفلوا عنها، ويعود ذلك جزئيًّا إلى أنها لا تظهر إلا في ضوء الأشعة تحت الحمراء. تبعد حافتها الداخلية عن الكوكب بمقدار ستة ملايين كيلومتر تقريبًا، وتبعد حافتها الخارجية مسافة ١٨ مليون كيلومتر تقريبًا. يدور القمر فيبي بداخلها، ومن المرجَّح أن يكون مسئولًا عن وجودها. رقيقة هي الحلقة للغاية؛ إذ إنها تتكوَّن من الجليد والغبار، وقد تساعد في حل لغزٍ طويل الأمد هو الجانب القاتم للقمر إيابيتوس. ذلك أنَّ أحد جانبي القمر إيابيتوس أسطع من الآخر، وهي ملاحظة حيرت علماء الفلك منذ عام ١٧٠٠ حين لاحظ كاسيني الحلقة لأول مرة. وكان الحل المقترح أنَّ إيابيتوس يكتسح موادَّ قاتمةً من الحلقة الضخمة.

وفي عام ٢٠١٥، أعلن[2] ماثيو كينورثي وإريك مامجيك أنَّ كوكبًا خارجيًّا بعيدًا يدور بالنجم J1407، يمتلك نظامًا من الحلقات يجعل نظام زحل أقل أهمية، حتى مع مراعاة الحلقة الأحدث. يستند هذا الاكتشاف إلى التقلبات المرصودة في منحنى الضوء، مثلما استند إليها اكتشاف حلقات أورانوس، وهي الطريقة الأساسية لتحديد مواقع الكواكب الخارجية (انظر الفصل الثالث عشر.) فبينما يمر (يعبر) الكوكب بالنجم، يخفت ضوء النجم. وفي هذه الحالة، تكرر خفوته على مدار شهرين، لكنَّ حدثَ الخفوت كان سريعًا نسبيًّا في كل مرة. استنتج العلماء من هذا أنَّ كوكبًا خارجيًّا له عدد من الحلقات كان يعبر المسار من النجم إلى الأرض. يضم النموذج الأفضل للحلقات ٣٧ حلقة، ويمتد نصف قطره إلى ٠٫٦ وحدة فلكية (٩٠ مليون كيلومتر). لم يُكشَف عن الكوكب الخارجي نفسه، لكن يُعتقَد أنَّ حجمه يتراوح بين ١٠ أضعاف المشتري و٤٠ ضعفًا له. يوجد في نظام الحلقات فجوة واضحة، سرعان ما فُسِّرت بوجود قمر خارجي يمكن تقدير حجمه هو أيضًا.

وفي عام ٢٠١٤، اكتُشِف نظام حلقي آخر في مكان مستبعد بالنظام الشمسي يقع بالقرب من (١٠١٩٩) تشاريكلو، وهو نوع من الأجرام الصغيرة يُسمى بالقنطور.[3] يدور هذا القنطور بين زحل وأورانوس، وهو أكبر القناطير المعروفة. ظهرت حلقاته في صورة انخفاضين طفيفين للسطوع في مجموعة من الملاحظات التي غطى (المصطلح التقني: حجب) تشارليكو فيها على عدد من النجوم. كان الموقعان النسبيان لهذين المنخفضين قريبين من القطع الناقص نفسه، مع وجود تشارليكو بالقرب من المركز؛ مما يشير إلى

وجود حلقتين قريبتين في مدارين دائريين إلى حدٍّ ما، يُرى مستواهما من زاوية. يبلغ نصف قطر إحدى الحلقتين ٣٩١ كيلومترًا ويمتد إلى ٧ كيلومترات تقريبًا، ثم توجد فجوة تبلغ تسعة كيلومترات، ثم تأتي الحلقة الثانية بنصف قطر يبلغ ٤٠٥ كيلومترات.

لأنَّ الأنظمة الحلقية تحدث مرارًا وتكرارًا، فلا يمكن أن تكون مجرد صدفة. فكيف تتكوَّن الأنظمة الحلقية. توجد ثلاث نظريات أساسية لمحاولة تفسير وجودها. ربما تكوَّنت حين التأم قرص الغاز الأصلي لتكوين الكوكب، ويمكن أن تكون آثار قمر تهشَّم بفعل اصطدام، ويمكن أيضًا أن تكون بقايا قمر اقتربت إلى ما هو أكثر من حد روش الذي تتجاوز القوى المدية عنده قوة الصخرة، فتفتت.

من غير المرجح أن يصل العلماء إلى نظام حلقي في أثناء تكوينه، بالرغم من أنَّ اكتشاف كينورثي ومامجيك يوضح أنه أمرٌ ممكن، لكنَّ أفضلَ ما يمكن أن يقدمه ذلك محض لقطة فحسب. إنَّ ملاحظة العملية ستستغرق مئات الأعمار. غير أنَّ ما يمكننا فعله هو تحليل التصورات الافتراضية رياضيًّا، والتوصل إلى تنبؤات ومقارنتها بالملاحظات. يشبه الأمر اصطياد حفريات لكن في السماء. فكل «حفرية» تقدم دليلًا على ما حدث في الماضي، لكنك تحتاج إلى فرضية لتأويل الدليل، وتحتاج إلى نماذج محاكاة رياضية أو استنتاجات، أو مبرهنات، وهو الأفضل، لكي تتمكَّن من فهم نتائج تلك الفرضية.

الفصل السابع

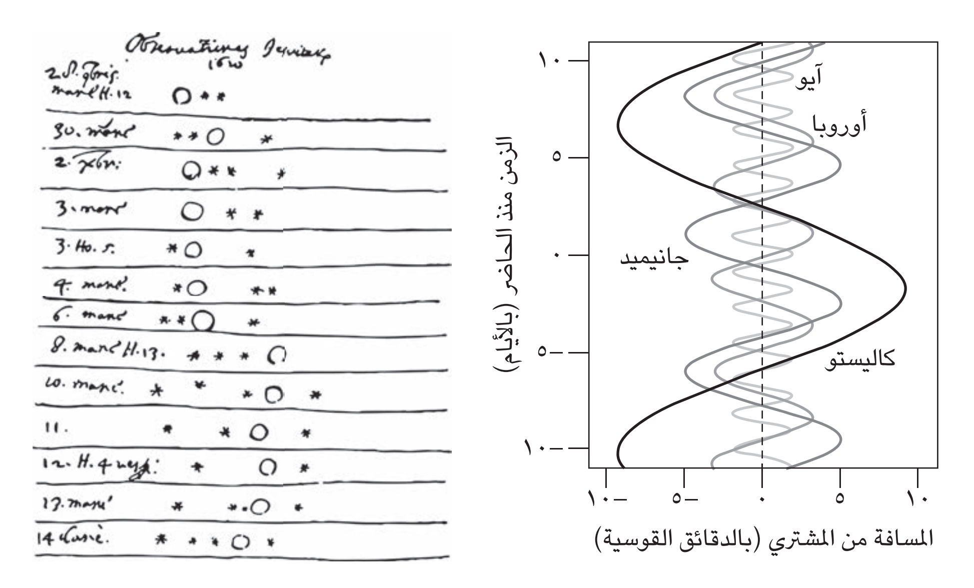
نجوم كوزيمو

«لَمَّا كان الأمر يرجع إليَّ، أنا المكتشف الأول، في تسمية هذه الكواكب الجديدة، فأنا أرغب في تسجيلها باسم جلالة الدوق الأكبر [كوزيمو الثاني دي ميديشي، دوق توسكانا الأكبر]، محاكاةً للحكماء العظماء الذين وضعوا أفضل الأبطال بين النجوم.»

جاليليو جاليلي، «رسالة فلكية»

حين رصد جاليلو المشتري لأول مرة عبر تلسكوبه الجديد، لاحظ وجود أربع نقاط ضئيلة من الضوء تدور حوله؛ إذن فللمشتري أقماره الخاصة. وقد كان هذا دليلًا مباشرًا على خطأ نظرية مركزية الأرض. رسم جاليليو ترتيب هذه الأقمار في مفكرته. يمكن بعد ذلك ربط الملاحظات الأكثر تفصيلًا معًا، كي نتمكن من رسم المسارات التي يبدو أنَّ هذه النقاط تتحرك فيها. وحين نفعل ذلك، نحصل على منحنيات جيبية جميلة. والطريقة الطبيعية لتوليد منحنًى جيبي هي رصد حركة دائرية منتظمة من الجانب. ولهذا، فقد استنتج جاليليو أنَّ نجوم كوزيمو تتحرك حول المشتري في دوائر، في مستوى مدار الشمس.

أوضحت التلسكوبات المحسنة أنَّ معظم كواكب النظام الشمسي لها أقمار. ويُعَد عطارد والزهرة هما الاستثناءين الوحيدين لذلك. فلدينا في الأرض قمر واحد، وللمريخ قمران، وللمشتري ٦٧ قمرًا على الأقل، ولزحل ٦٢ قمرًا على الأقل إضافةً إلى مئات القميرات، ولأورانوس ٢٧ قمرًا، ولنبتون ١٤ قمرًا. ولبلوتو خمسة أقمار. يتراوح حجم هذه الأقمار من صخور صغيرة ذات أشكال غير منتظمة إلى أشكال كروية إهليلجية كبيرة بما يكفي



على اليسار: سجلات جاليليو للأقمار. على اليمين: مواقع أقمار المشتري كما تُرى من الأرض، مكوِّنةً منحنيات جيبية.

لتكون كواكب صغيرة. يمكن أن تتكوَّن أسطحها من الصخور بصفة أساسية أو من الجليد أو الكبريت أو الميثان المتجمد.

يتسابق قمرا المريخ الصغيران، فوبوس وديموس، في سماء المريخ، ويُعَد فوبوس قريبًا للغاية حتى إنه يتحرك في الاتجاه المعاكس لديموس. كلا الجِرمين غير منتظم الشكل، وهما كويكبان مأسوران على الأرجح، أو ربما يكونان كويكبًا مأسورًا يتخذ شكل البطة مثل المذنَّب «٦٧ بي»، الذي اتضح مؤخرًا أنه جسمان قد اقترب أحدهما من الآخر بلطف والتصقا. إذا كان هذا صحيحًا، فإنَّ الكويكب الذي أسره المريخ أتى غير ملتصق من جديد بسبب جاذبية الكوكب؛ فيمثل فوبوس قطعة واحدة، بينما يمثل ديموس القطعة الأخرى.

بعض الأقمار تبدو ميتة تمامًا، ويبدو بعضها نشطًا. فقمر زحل، إنسيلادوس، ينتج ينابيع جليدية شاهقة يصل ارتفاعها إلى ٥٠٠ كيلومتر. ويتسم قمر المشتري، آيو، بسطحه الكبريتي، وبركانين نشطين على الأقل هما لوكي وبيليه اللذين يفيضان بالمركبات الكبريتية. لا بد أنه توجد مستودعات ضخمة تحت السطح تمتلئ بالكبريت السائل، ومن

المرجح أن يكون مصدر الطاقة التي تسخنها هو ضغط جاذبية المشتري. أما قمر زحل، تيتان، فيمتلك غلافًا جويًّا من الميثان، أكثر كثافةً مما ينبغي أن يكون عليه بدرجة كبيرة. ويدور قمر نبتون، ترايتون، حول الكوكب في الاتجاه الخاطئ، مما يشير إلى أنه قد أُسِر. فهو يدور حلزونيًّا ببطء إلى الداخل، وبعد ٣٫٦ مليارات عام من الآن، سيتحطم حين يصل إلى حد روش، وهو المسافة التي تتحطم الأقمار عندها بفعل إجهاد الجاذبية.

غالبًا ما تظهر في أقمار الكواكب الأكبر، علاقات رنينية. ففترة قمر أوروبا على سبيل المثال، تبلغ ضعف فترة آيو، وتبلغ فترة جانيميد ضعف فترة أوروبا، ومن ثمَّ أربعة أضعاف آيو. تتولد العلاقات الرنينية من ديناميكيات الأجسام التي تخضع لقوانين نيوتن للجاذبية. إنَّ الكواكب ذات الأنظمة الحلقية تراكم الأقمار ببطء على حافة الحلقات، ثم «تلفظها» واحدًا تلو الآخر، مثلما تتقطر المياه من صنبور. وتنطوي هذه العملية على انتظامات رياضية.

تشير مسارات مختلفة من الأدلة، بعضها رياضي، إلى أنَّ العديد من الأقمار الجليدية توجد بها محيطات جوفية أذابتها القوى المدية. ويحتوي أحدها على الأقل أكثر مما تحتوي عليه جميع محيطات الأرض مجتمعة. إنَّ وجود المياه السائلة بها يجعلها مواطن محتملة لأشكال بسيطة من الحياة شبيهة بتلك الموجودة على الأرض؛ انظر الفصل الثالث عشر. ويمكن للطبيعة الكيميائية الغريبة لتيتان أن تجعل منه موطنًا محتملًا لأشكال من الحياة مختلفة عن تلك الموجودة على الأرض.

ثمَّة كويكب واحد على الأقل يمتلك قمرًا ضئيلًا للغاية؛ إيدا الذي يدور به القمر الضئيل داكتيل. إنَّ الأقمار مذهلة للغاية، ملعب لنمذجة الجاذبية والتنظير العلمي من جميع الأنواع. ويعود الأمر في ذلك كله إلى جاليليو ونجوم كوزيمو.

في عام ١٦١٢، حين حدَّد جاليليو الفترات المدارية لنجوم كوزيمو، اقترح أنَّ الجداول الدقيقة لحركاتها ستوفر ساعة في السماء، مما يحل مشكلة خط الطول في الإبحار. ففي ذلك الوقت، كان البحَّارون يستطيعون تقدير خط العرض من خلال مراقبة الشمس (وإن كانت آلات دقيقة مثل آلة الدسية ستُخترع في المستقبل)، أما خط الطول، فقد كان يعتمد على تقدير الموضع فحسب، وهو محض تخمين مدروس. كانت المشكلة العملية الأساسية هي الملاحظة من على متن السفينة وهي تترامى على الأمواج، وقد عمل على تصميم جهازين لتثبيت تلسكوب. استُخدِمت هذه الطريقة على اليابسة، لكنها لم تُستخدم



كويكب إيدا (يسارًا) وقمره داكتيل (يمينًا).

في البحر. وقد حلَّ جون هاريسون مشكلة خط الطول بمجموعته من أجهزة الكرونوميتر الدقيقة للغاية، ومُنِح جائزة مالية عام ١٧٧٣.

قدمت أقمار المشتري لعلماء الفلك مختبرًا سماويًّا يسمح لهم بمراقبة أنظمةٍ تتكوَّن من أجرام متعددة. جدولوا حركاتها وحاولوا تفسيرها والتنبؤ بها نظريًّا. وتتمثَّل إحدى طرق الحصول على قياسات دقيقة في رصد عبور قمر أمام وجه الكوكب؛ لأنَّ بداية العبور ونهايته حدثان معرَّفان على نحوٍ جيد. تُعد ظواهر الخسوف التي تحدث حين يصبح القمر خلف الكوكب، معروفة على نحوٍ جيد هي أيضًا. قال جيوفاني هوديرنا بذلك عام ١٦٥٦، وبعد عَقد من الزمان تقريبًا بدأ كاسيني سلسلة مطولة من الملاحظات المنهجية، ولاحظ فيها تصادفًا زمنيًّا آخر مثل ظواهر الاقتران التي يبدو فيها أنَّ قمرين يصطفان على الخط نفسه. وقد فوجئ حين لاحظ أنَّ مرات العبور لا تتسق مع الأقمار التي تتحرك في مدارات منتظمة متكررة.

تبع عالم الفلك الدنماركي أولي رومر اقتراح جاليليو بشأن خط الطول، وفي عام ١٦٧١، راقب هو وجان بيكار ١٤٠ خسوفًا لقمر آيو من أورارنيبورج بالقرب من كوبنهاجن، بينما فعل كاسيني الأمر نفسه من باريس. ومن خلال المقارنة بين التوقيتات، حسبوا الاختلاف في خطوط الطول بين هذين الموقعين. كان كاسيني قد لاحظ بالفعل بعض الأمور الغريبة في الملاحظات، وتساءل عمَّا إذا كانت ناتجة عن وجود سرعة محددة

للضوء. جمع رومر بين كل الملاحظات واكتشف أنَّ الوقت بين أحداث الخسوف المتتالية صار أقصر حين كانت الأرض أقرب إلى المشتري، وصار أطول حين كانت أبعد عنه. وفي عام ١٦٧٦، أخبر أكاديمية العلوم بالسبب: «يبدو أنَّ الضوء يستغرق من ١٠ دقائق إلى ١١ دقيقة [ليعبر] مسافة تساوي نصف قطر المدار الأرضي.» استند هذا الرقم الذي توصَّل إليه على حسابات هندسية متأنية، لكنَّ الملاحظات لم تكن دقيقة؛ فالقيمة الحديثة هي ٨ دقائق و١٢ ثانية. لم ينشر رومر نتائجه في ورقة رسمية قط، لكنَّ مراسِلًا صحافيًّا غير معروف لخَّص المحاضرة على نحوٍ سيئ. ولم يقبل العلماء أنَّ للضوء سرعة محددة حتى العام ١٧٢٧.

بالرغم من الأمور غير المنتظمة، لم يلاحظ كاسيني قط أي اقتران ثلاثي للأقمار الداخلية: آيو وأوروبا وجانيميد؛ أي أنه لم يلحظ اصطفاف هذه الأجرام الثلاثة معًا في الوقت نفسه؛ ومن ثمَّ فلا بد أنَّ ثمَّة شيئًا يمنع هذا. إنَّ الفترات المدارية لهذه الأجرام تتخذ نسبة ١:٢:٤، وفي عام ١٧٤٣، أوضح بير وارجنتين، مدير مرصد ستوكهولم، أنَّ هذه العلاقات تصبح دقيقة على نحوٍ مذهل إذا أُعيد تأويلها على نحو صحيح. فعند قياس مواقعها بصفتها زوايا نسبية إلى نصف قطر محدد، اكتشف علاقة مميزة:

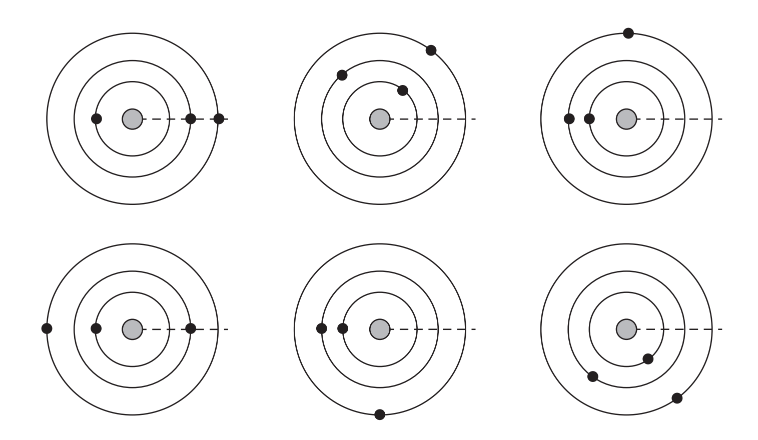
زاوية آيو − ٣ × زاوية أوروبا + ٢ × زاوية جانيميد = ١٨٠°.

وفقًا لهذه الملاحظة، تنطبق هذه العلاقة على نحوٍ دقيق تقريبًا على مدار فترات زمنية طويلة، «بالرغم من» عدم الانتظام في مدارات الأقمار الثلاثة. إنَّ الاقتران الثلاثي يستلزم أن تكون الزوايا الثلاثة متساوية، لكنها إذا كانت متساوية، فسيساوي الطرف الأيسر من هذه المعادلة ٠° وليس ١٨٠°. ومن ثمَّ يصير الاقتران الثلاثي مستحيلًا ما دامت العلاقة صحيحة. وقد ذكر وارجنتين أنه لن يحدث إلا بعد ١٫٣ مليون عام على الأقل.

تنطوي هذه المعادلة أيضًا على نمط محدَّد لاقترانات هذه الأقمار، التي تحدث في دورة متكررة:

أوروبا مع جانيميد.
آيو مع جانيميد.
آيو مع أوروبا.
آيو مع جانيميد.

آيو مع أوروبا.
آيو مع جانيميد.



الاقترانات المتتالية لأقمار المشتري الثلاثة الأبعد إلى الداخل: آيو وأوروبا وجانيميد (بالترتيب من الداخل إلى الخارج.)

قرَّر لابلاس أنَّ صيغة وارجينتين لا يمكن أن تكون تصادفًا زمنيًّا؛ ومن ثمَّ فلا بد من وجود سبب ديناميكي. وفي عام ١٧٨٤، استنتج الصيغة من قانون نيوتن للجاذبية. تشير حساباته إلى أنه مع مرور فترات طويلة، لا تظل توليفات الزوايا المعنية عند ١٨٠°، وإنما تتحرر؛ أي تتذبذب ببطء إلى أي من طرفي تلك القيمة، بما يقل عن ١°. تلك القيمة صغيرة بما يكفي لمنع حدوث الاقتران الثلاثي. وقد تنبأ بأنَّ فترة هذا التذبذب تبلغ ٢٢٧٠ يومًا. يبلغ الرقم المرصود اليوم ٢٠٧١ يومًا، لم يكن تنبؤه سيئًا. وتكريمًا له، تُسمى العلاقة بين الزوايا الثلاث باسم رنين لابلاس. لقد كان نجاحه تأكيدًا مهمًّا لقانون نيوتن.

الآن نعرف السبب في عدم انتظام مرات العبور. وهو أنَّ جاذبية المشتري تتسبب في تقدم مدارات أقمارها التي تتخذ شكل القطع الناقص تقريبًا، (مثلما يتقدم مدار عطارد حول الشمس)، من ثمَّ يتغير موقع نقطة حضيض المشتري «بيريجوف»، وهي النقطة الأقرب من المشتري إلى الشمس، بسرعة إلى حدٍّ ما. في صيغة رنين لابلاس، تُلغى قيم التقدم هذه، لكنَّ تأثيرها قوي على أحداث العبور الفردية.

تُدعى أي علاقة مشابهة أيضًا باسم رنين لابلاس. ويمتلك النجم جليزا ٨٧٦ نظامًا من الكواكب الخارجية اكتُشِف أولها عام ١٩٩٨. نعرف الآن أربعة من هذه الكواكب، وتبلغ الفترات المدارية لثلاثة منها: جليزا 876c، وجليزا 876b، وجليزا 876e، ٣٠,٠٠٨ و٦١,١١٦ و١٢٤,٢٦ يومًا؛ أي إنها تقترب على نحوٍ مثير للريبة من النسب ١:٢:٤. وفي عام ٢٠١٠، أثبت أوخينو ريفيرا وزملاء له[1] أنَّ العلاقة في هذه الحالة على النحو التالي:

زاوية 876c − ٣ × زاوية 876b + ٢ × زاوية 876e = ٠°.

غير أنَّ الناتج يتحرَّر عند ٠° بمقدار ٤٠°، وهو تذبذب أكبر كثيرًا. الآن يصير الاقتران الثلاثي ممكنًا، وتحدث الاقترانات الثلاثية القريبة مرةً في كل دورة للكواكب الأبعد إلى الخارج. وتشير نماذج المحاكاة إلى أنَّ التذبذب عند ٠° سيكون فوضويًّا، مع فترة تبلغ ١٠ سنوات تقريبًا.

تتسم ثلاثة من أقمار بلوتو: نيكس وستيكس وهيدرا، بعلاقة رنين يشبه رنين لابلاس، لكنَّ متوسط نسب الفترات في هذه الحالة يبلغ ١٨:٢٢:٣٣، ويبلغ متوسط النسب المدارية ١١:٩:٦. فتصير المعادلة الآن كما يلي:

٣ × زاوية ستيكس − ٥ × زاوية نيكس + ٢ × زاوية هيدرا = ١٨٠°.

ومن ثمَّ، فإنَّ الاقترانات الثلاثية محالة في هذه الحالة وفقًا للتبرير المنطقي نفسه الذي ينطبق على حالة أقمار المشتري. توجد خمسة اقترانات بين ستيكس وهيدرا، وثلاثة اقترانات بين نيكس وهيدرا لكل اقترانين بين ستيكس ونيكس.

لكلٍّ من أوروبا وجانيميد وكاستيلو أسطح جليدية. وتشير مسارات عدة من الأدلة إلى أنَّ ثلاثتها تحتوي على مياه سائلة تحت الجليد. كان أول قمر شكَّ العلماء بأنه يحتوي على مثل ذلك المحيط هو أوروبا. ينبغي أن يوجد مصدر للحرارة ليذيب الجليد. والقوى المدية التي يبذلها المشتري تضغط أوروبا بصفة متكررة، لكن الرنين مع آيو وجانيميد يحول دون إفلاته من خلال تغيير المدار. يؤدي الضغط إلى تسخين لب القمر، وتشير الحسابات إلى أنَّ مقدار الحرارة كافٍ لإذابة الكثير من الجليد. ولأنَّ السطح جليد صلب، فلا بد أن تكون المياه في الأعماق، وهي تشكل على الأرجح قشرة كروية سميكة.

ثمَّة دليل آخر يؤيد ذلك، وهو أنَّ السطح شديد التشقق مع وجود بضع علامات على الفُوَّهات. والتفسير الأرجح لهذا هو أنَّ الجليد يشكل طبقة سميكة تطفو على المحيط. يولِّد المجال المغناطيسي للمشتري، مجالًا مغناطيسيًّا أضعف في أوروبا، وحين قاس المتتبِّع

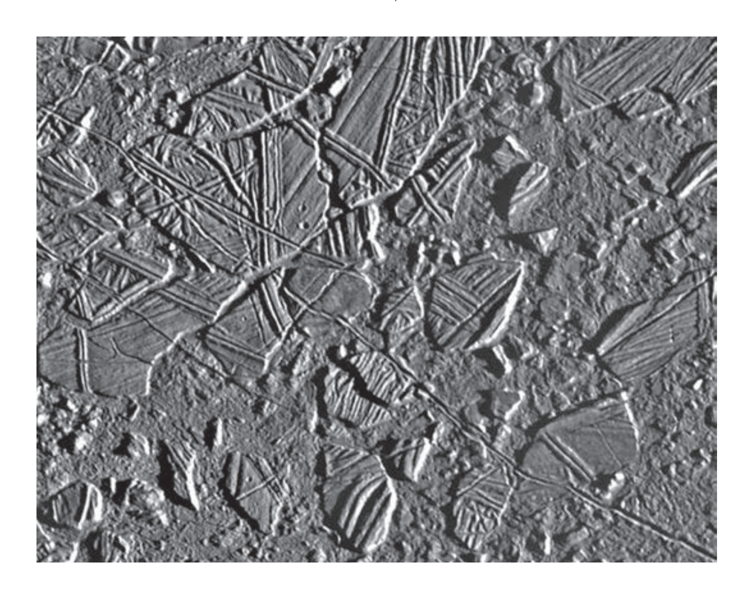
«جاليليو» المجال المغناطيسي لأوروبا، أشارت التحليلات الرياضية إلى أنه لا بد من وجود كتلة كبيرة من مادة موصلة تقبع تحت جليد أوروبا. والمادة الأكثر ترجيحًا في ضوء البيانات هي المياه المالحة.

يضم سطح أوروبا عددًا من مناطق «تضاريس الفوضى»؛ حيث يكون الجليد غيرَ منتظمٍ للغاية ومبعثرًا. من هذه المناطق «كونامارا كيوس»، التي يبدو أنها تكوَّنت من عددٍ لا يُحصى من الطوافات الجليدية التي تكسَّرت وتحطمت. ثمَّة مناطق أخرى مثل «أران كيوس» و«موريياس كيوس» و«ناربيث كيوس» و«راذمور كيوس». تحدث بعض التكوينات المشابهة على الأرض في كتل الجليد التي تطفو على البحار، عند وجود أحد عوامل الإذابة. في عام ٢٠١١، شرح فريق بقيادة بريتني شميت، أنَّ التضاريس الفوضوية تتشكَّل حين تنهار الصفائح الجليدية التي تقبع فوق بحيرات المياه السائلة التي تتخذ شكل العدسة. إنَّ هذه البحيرات أقرب إلى السطح منها إلى المحيط نفسه، ربما لا تبعد عن السطح بأكثر من ثلاثة كيلومترات.[2] ثمَّة منخفض من هذا النوع يُعرف باسم «ثيرا ماكولا» يضم بحيرة تحتية تبلغ كمية مياهها مقدارَ ما تحتوي عليه البحيرات العظمى في أمريكا الشمالية.

إنَّ بحيرات أوروبا عدسية الشكل أقرب إلى السطح منها إلى المحيط الأساسي. وتشير أفضل التقديرات الآن إلى أنَّه بخلاف تلك البحيرات، يبلغ سمك الطبقة الخارجية من الجليد من ١٠–٣٠ كيلومترًا، ويبلغ عمق المحيط ١٠٠ كيلومتر. وإذا كانت هذه التقديرات صحيحة، فمعنى هذا أنَّ محيط أوروبا يحتوي على ضعف حجم المياه في جميع محيطات الأرض مجتمعة.

بناءً على أدلة مشابهة، فإنَّ جانيميد وكاستيلو أيضًا يضمان محيطات تحت السطح. غير أنَّ طبقة الجليد الخارجية في جانيميد أكثر سمكًا، يبلغ سمكها ١٥٠ كيلومترًا تقريبًا، ويبلغ عمق المحيط الموجود تحتها ١٠٠ كيلومتر. والأرجح أنَّ محيط كاستيلو يقبع هو أيضًا على المسافة نفسها تحت الجليد، ويتراوح عمق محيطه من ٥٠–٢٠٠ كيلومتر. إنَّ كل هذه الأرقام تقريبية فحسب، وستؤدي الاختلافات الكيميائية، مثل وجود الأمونيا، إلى تغييرها بدرجة كبيرة.

أحد أقمار زحل، إنسيلادوس، بارد للغاية ويبلغ متوسط درجة حرارة سطحه ٧٥ كلفن (أي سالب ٢٠٠° مئوية تقريبًا). يمكن أن تتوقَّع من هذا ألا يوجد عليه قدر كبير من النشاط، وكذلك توقَّع علماء الفلك إلى أن اكتشفت مركبة الفضاء «كاسيني» أنه يطلق



منطقة «كونامارا كيوس» على قمر أوروبا.

ينابيع ضخمة من جسيمات الجليد، وبخار الماء وكلوريد الصوديوم، ترتفع إلى مئات الكيلومترات. بعض هذه المواد يفلت كليًّا ويُعتَقد أنه المصدر الأساسي للحلقة E في النظام الحلقي لزحل، التي تحتوي على ٦٪ من كلوريد الصوديوم. أما الباقي فيسقط ثانية على السطح. كان التفسير الأكثر منطقية لهذا هو وجود محيط ملحي تحت السطح، وقد تأكد في عام ٢٠١٥ من خلال تحليل رياضي لمقدار سبع سنوات من البيانات لاهتزازات طفيفة في توجيه القمر (المصطلح التقني: نودان أو ميسان القمر)، والتي قيست من خلال رصد المواقع الدقيقة للفُوَّهات.[3] يهتز القمر في نطاق زاوية تبلغ ٠٫١٢ درجة. وتلك قيمة أكبر كثيرًا من أن تكون متسقة مع وجود رابط صلب بين لب إنسيلادوس وسطحه الجليدي، وهي تشير إلى وجود محيط شامل أكثر مما تشير إلى وجود بحر قطبي محدد. يبلغ سمك جليد السطح على الأرجح من ٣٠ إلى ٤٠ كيلومترًا، ويبلغ عمق المحيط ١٠ كيلومترات؛ أي أكثر من متوسط عمق محيطات الأرض.

تدور سبعة من أقمار زحل خارج حافة حلقة الكوكب الأساسية الخارجية، الحلقة A. وهذه الأقمار صغيرة للغاية وكثافتها شديدة الانخفاض، مما يشير إلى وجود فراغات

بداخلها. يتخذ العديد منها شكل الأطباق الطائرة، ويتسم بعضها بأسطح ملساء غير منتظمة. وهذه الأقمار السبعة هي: بان، ودافنيس، وأطلس، وبروميثيوس، وباندورا، وجانوس، وإبيميثيوس.

في عام ٢٠١٠، قام كلٌّ من سيبستيان شارنوز، وجوليان سالمُن، وأورليان كريدا،[4] بتحليل الكيفية التي يمكن أن تكون الحلقة قد تطوَّرت بها، مع «أجرام اختبار» افتراضية على حافتها، وكان الاستنتاج هو أنَّ هذه الأقمار قد لُفِظت من الحلقات عند اجتياز المادة لحد روش. عادةً ما يُعرَّف حد روش على أنه المسافة التي تتحطم الأقمار في داخلها بفعل إجهاد الجاذبية، لكنه على العكس من ذلك أيضًا هو المسافة التي تصبح الحلقات خارجها غير مستقرة، ما لم تؤدِّ آليات أخرى، كالأقمار الراعية، إلى استقرارها. يبلغ حد روش لزحل (١٤٠٠٠٠ ± ٢٠٠٠ كيلومتر)، وهو يبلغ خارج الحلقة A، (١٣٦٧٧٥ كيلومترًا.) يقع بان ودافينس داخل حد روش، أما الأقمار الخمسة الأخرى، فتقع خارجه.

لطالما شك علماء الفلك بأنه لا بد من وجود علاقة بين الحلقات وبين هذه الأقمار؛ لأنَّ مسافاتها القطرية متقاربة للغاية معًا. تتسم الحلقة A، بحدٍّ حادٍّ للغاية تشكَّل بسبب علاقتها الرنينية مع جانوس بنسبة ٦:٧، والتي تمنع القدر الأكبر من مادة الحلقة من التحرك لمسافة أبعد إلى الخارج. وهذه العلاقة الرنينية مؤقتة؛ فالحلقات «تدفع» جانوس إلى الخارج، بينما تتحرك هي في البداية إلى الداخل قليلًا لحفظ الزخم الزاوي. وبينما يستمر جانوس في التحرك إلى الخارج، يمكن للحلقات أن تنتشر للخارج مجددًا، مجتازة حد روش.

يؤيد التحليل هذا الرأي، موضحًا إمكانية دفع جزء من مادة الحلقة مؤقتًا خارج حد روش من خلال الانتشار اللزج؛ أي مثلما تنتشر قطرة من الدبس على طاولة المطبخ ببطء وتصبح أرقَّ. تجمع طريقتهم بين نموذج تحليلي لأجسام الاختبار، ونموذج عددي لديناميكيات سوائل الحلقات. يتسبَّب الانتشار اللزج المستمر في أن تلفظ الحلقات عددًا متتاليًا من القميرات الضئيلة التي تتشابه مداراتها مع الواقع بدرجة كبيرة. وتشير الحسابات إلى أنَّ هذه القميرات عبارة عن تجمعات من جسيمات جليد من الحلقات، تتماسك معًا على نحو فضفاض بفعل جاذبيتها، مما يفسِّر كثافتها المنخفضة وأشكالها الغريبة.

تلقي النتائج بعض الضوء أيضًا على سؤال قائم منذ فترة طويلة، وهو عمر الحلقات. تتمثَّل إحدى النظريات في أنَّ الحلقات تشكلت من السديم الشمسي المنهار في الوقت الذي

تشكَّل فيه زحل تقريبًا. غير أنَّ قمرًا مثل جانوس ينبغي ألا يستغرق أكثر من ١٠٠ مليون عام كي ينجرف خارجًا من الحلقة A إلى مداره الحالي، مما يطرح نظرية بديلة، وهي أنَّ كلًّا من الحلقات والقميرات ظهر معًا حين مرَّ قمر داخل حد روش وتهشم قبل عشرات الملايين من الأعوام. تقلل نماذج المحاكاة هذه الفترة إلى ما بين مليون عام و١٠ ملايين من الأعوام؛ فيقول المؤلفون: «ربما تكون حلقات زحل هي آخر مكان نشطَ فيه التراكم حديثًا في النظام الشمسي قبل فترة تتراوح بين $١٠^{٦}$–$١٠^{٧}$ أعوام، وهي تشبه في ذلك قرصًا كوكبيًّا بدائيًّا مصغرًا.»

الفصل الثامن

رحلة على مذنَّب

«يجوز القول بصدق تام إنَّ صيادًا يقف على سطح الشمس ممسِكًا بصنارة طويلة بالدرجة الكافية، لا يمكن أن يطرح صنارته في أي اتجاه دون أن يعلق بها عددٌ كبير من المذنَّبات.»

جول فيرن «رحلة على مذنَّب»!

«عندما يموت الشحاذون، لا تظهر أية مذنَّبات، لكنَّ السماء نفسها تتقد لموت الأمراء.» هذا ما تقوله كالبورينا في المشهد الثاني من الفصل الثاني في مسرحية «يوليوس قيصر» لشكسبير، متنبئة بهلاك قيصر. من بين الإشارات الخمس للمذنَّبات في أعمال شكسبير، تعكس ثلاثة منها الاعتقاد القديم بأنَّ المذنَّبات تنذر بالكوارث.

فهذه الأجسام الغريبة المحيرة تظهر فجأة في سماء الليل تجر خلفها ذيلًا لامعًا منحنيًا، وتتحرك ببطء على خلفية النجوم، ثم تختفي من جديد. إنها أجسام متطفلة غير معروفة لا يبدو أنها تتبع الأنماط المعتادة للأحداث الفلكية. من المنطقي إذن أن تُفسَّر المذنَّبات على أنها رسل من الآلهة في العصور التي لم تتوفَّر فيها المعرفة، والتي كان الكهان والشامانات يسعون فيها على الدوام لتعزيز تأثيرهم. كان الافتراض الشائع أنَّ ما تأتي به من رسائل ينذر بالسوء. وقد كان يوجد ما يكفي من الكوارث الطبيعية حتى إنك إن لم تكن ترغب في تصديق هذا الافتراض، فما كان إيجاد تأكيد مقنع ليصبح عسيرًا. كان المذنَّب «ماكنوت» الذي ظهر عام ٢٠٠٧، هو الأكثر سطوعًا على مدار ٤٠ عامًا. ومن الجلي أنه أنذر بالأزمة المالية التي حدثت في الفترة ٢٠٠٧–٢٠٠٨. أرأيت؟ يمكن لأي شخص أن يقع في هذا الخطأ.



المذنَّب العظيم لعام ١٥٧٧ فوق براج. نقش الفنان جيري داشيتسكي.

زعم الكهان أنهم يعرفون سبب المذنَّبات، لكنهم لم يكونوا يعرفون مواقعها، لا هم ولا الفلاسفة. أكانت أجرامًا فلكية كالنجوم والكواكب؟ أم أنها ظواهر جوية مثل السحب؟ لقد «بدت» شبيهة بالسحب بعض الشيء؛ فهي مغبشة وليست محددة كالنجوم والكواكب. غير أنها كانت تتحرك كالكواكب فيما عدا ظهورَها واختفاءها المفاجئين. وفي نهاية المطاف، حُسِم الجدال بالأدلة العلمية. فحين استخدم عالم الفلك تايكو براخي القياسات الدقيقة لتقدير المسافة إلى المذنَّب العظيم لعام ١٥٧٧، أثبت أنه أبعد كثيرًا من القمر. ولمَّا كانت السحب هي التي تحجب القمر وليس العكس، فإنَّ المذنَّبات تقطن الفلك.

وبحلول عام ١٧٠٥، تقدَّم إيدموند هالي إلى ما هو أبعد، موضحًا أنَّ مذنَّبًا واحدًا على الأقل هو زائر منتظم لسماء الليل. فالمذنَّبات كالكواكب: تدور بالشمس. تبدو المذنَّبات قد اختفت حين تذهب بعيدًا عمَّا يمكن رؤيته لكنها تعاود الظهور حين تقترب بالدرجة الكافية مجددًا. لماذا تنمو لها ذيول ثم تفقدها؟ لم يكن هالي متأكدًا، لكنَّ الأمر يتعلق بقربها من الشمس.

لقد كانت فكرة هالي عن المذنَّبات، أحد الاكتشافات الكبيرة الأولى في علم الفلك التي تُستنتج من الأنماط الرياضية التي اكتشفها كيبلر، وأعاد نيوتن تأويلها بصفة أعم. لما كانت الكواكب تتحرك في مدارات إهليلجية، فقد تساءل هالي: لمَ لا تكون المذنَّبات تفعل ذلك هي أيضًا؟ وإذا كان هذا صحيحًا، فسوف تكون حركتها دورية، ويتكرر ظهور المذنَّب نفسه في السماء الأرضية، على فترات زمنية متساوية. عدَّل قانون نيوتن للجاذبية من هذه العبارة قليلًا: ستكون الحركة دورية «في معظمها»، لكنَّ سحب الجاذبية الناتج عن كواكب أخرى، لا سيما العملاقين: المشتري وزحل، ستسرع عودة المذنَّب أو تؤخرها.

لاختبار هذه النظرية، غاص هالي في سجلات غامضة للمرات التي شُوهدت فيها المذنَّبات. قبل اختراع جاليليو للتلسكوب لم تكن تُرى سوى المذنَّبات الظاهرة للعين المجردة. كان منها بضعة ساطعة على نحوٍ استثنائي، ولها ذيل مدهش. رأى بيتروس أبيانوس أحدها عام ١٥٣١، ورصد كيبلر آخر عام ١٦٠٧، وظهر مذنَّب مشابه خلال حياة هالي عام ١٦٨٢. تبلغ الفترتان الفاصلتان بين هذه التواريخ ٧٥ عامًا و٧٦ عامًا. أيمكن أن تكون هذه المشاهدات الثلاث كلها للجسم «نفسه»؟ كان هالي مقتنعًا بأنها كذلك، وتنبأ بأنَّ المذنَّب سيعود عام ١٧٥٨.

وقد كان محقًّا تمامًا. ففي يوم عيد الميلاد من ذلك العام، رأى الفلكي الألماني الهاوي يوهان باليتشش، بقعة خافتة في السماء سرعان ما ظهر بها الذيل المميِّز للمذنَّبات. بحلول ذلك الوقت، كان ثلاثة من الرياضيين الفرنسيين هم: أليكسيس كليروت وجوزيف لالاند ونيكول-رين ليبوت، قد أجرَوا حسابات أكثر دقة عدَّلت تاريخ أقرب ظهور للمذنَّب إلى يوم الأحد الموافق للثالث عشر من أبريل. كان التاريخ الفعلي قبل شهر من ذلك؛ ومن ثمَّ فقد أدت الاضطرابات الناتجة عن المشتري وزحل إلى تأخير المذنَّب ٦١٨ يومًا.

مات هالي قبل أن يتمكَّن من التحقق من تنبُّئه. وما ندعوه الآن بمذنَّب هالي (سُمِّي باسمه عام ١٧٥٩) هو أول جسم ليس بكوكب يثبت أنه يدور حول الشمس. من خلال مقارنة السجلات العتيقة لمداره السابق بالحسابات الحديثة لذلك، يمكن تتبُّع تاريخ مذنَّب هالي إلى عام ٢٤٠ قبل الميلاد، حين ظهر في الصين. وسُجِّلت المرة التالية لظهوره عام ١٦٤ قبل الميلاد على لوح طيني بابلي. رآه الصينيون مرة أخرى عام ٨٧ قبل الميلاد، ثم عام ١٢ قبل الميلاد، ثم عام ٦٦ ميلاديًّا، وعام ١٤١ ميلاديًّا ... وغير ذلك من المرات. لقد كان تنبؤ هالي بعودة المذنَّب الحتمية، من أولى التنبؤات الفلكية المبتكرة بحق التي تستند إلى نظرية رياضية لديناميكيات الأجرام السماوية.

ليست المذنَّبات لغزًا فلكيًّا عويصًا فحسب. فقد ذكرت في المقدمة نظرية واسعة النطاق تتضمن المذنَّبات وتفيد بأنها صارت على مدار العقود القليلة هي التفسير المفضَّل للكيفية التي حصلت بها الأرض على محيطاتها. تتكوَّن المذنَّبات من الجليد بصفة أساسية، ويتشكل الذيل حين يقترب المذنَّب من الشمس بما يكفي لأن «يتصعد» الجليد؛ أي يتحول مباشرة من مادة صلبة إلى بخار. توجد أدلة ظرفية مقنعة على أنَّ الكثير من المذنَّبات اصطدمت بالأرض في بداياتها، وفي تلك الحالة سيذوب الجليد ويتجمع ليشكل المحيطات. ستُدمج المياه أيضًا في التركيب الجزيئي لصخور القشرة الأرضية التي تحتوي بالفعل على الكثير منها.

إنَّ مياه الأرض ضرورية لأشكال الحياة الموجودة على الكوكب؛ لذا فإن فهمنا للمذنَّبات يمكن أن يخبرنا بشيء مهم عن أنفسنا. يذكر ألكساندر بوب في قصيدته «مقالة عن الإنسان» المنشورة في عام ١٧٣٤، ذلك البيت الشهير الذي يقول فيه: «أفضل ما يدرسه بنو البشر هم البشر أنفسهم.» بالرغم من ذلك، وبدون التعمق في الأهداف الروحانية والأخلاقية من القصيدة، فإنَّ أي دراسة للإنسانية ينبغي أن تتضمن دراسة «سياق» البشر، لا البشر أنفسهم فحسب. وهذا السياق هو الكون بأكمله؛ لذا فستكون مقولة بوب بخلاف هذا: أفضل ما يدرسه بنو البشر، هو «كل شيء».

حتى اليوم، صنَّف علماء الفلك ٥٢٥٣ من المذنَّبات. وهي تنقسم إلى نوعين أساسيين؛ المذنَّبات الطويلة الأمد التي تستغرق فترتها المدارية ٢٠٠ عام أو أكثر، وتمتد مداراتها إلى ما وراء النطاق الخارجي للنظام الشمسي، والمذنَّبات القصيرة الأمد التي تبقى قريبًا من الشمس، وعادةً ما تكون مداراتها أكثر استدارة وإن كانت ما تزال إهليلجية الشكل. يُعد مذنَّب هالي الذي تستغرق فترته المدارية ٧٥ عامًا، من المذنَّبات القصيرة الأمد. بضعة من المذنَّبات تتخذ مداراتها شكل القطع الزائد، وقد تناولنا القطوع الزائدة بالفعل في الفصل الأول، وهي من المقاطع المخروطية التي عرفها علماء الهندسة من اليونانيين القدماء. وهي لا تنغلق، على عكس القطوع الناقصة. تبدو الأجرام التي تسير في مداراتٍ تتخذ هذا الشكل من على مسافة شاسعة وهي تمر بالشمس سريعًا، وإذا تفادت الاصطدام بها، فإنها تخرج ثانيةً إلى الفضاء، ولا تُرى بعد ذلك أبدًا.

إنَّ شكل القطع الزائد يشير إلى أنَّ هذه المذنَّبات تسقط من الفضاء بين النجمي باتجاه الشمس، لكنَّ علماء الفلك يعتقدون الآن أنَّ معظمها، أو ربما كلها، كان يتبع في الأصل مدارات مغلقة قبل أن يتسبَّب المشتري في اضطرابها. إنَّ الفرق بين القطوع

الناقصة والقطوع الزائدة يتضمن طاقة الجسم. فتحت قيمة حرجة من الطاقة، يكون المدار قطعًا ناقصًا مغلقًا. وفوق تلك القيمة، يكون المدار قطعًا زائدًا. وعند تلك القيمة، يكون المدار قطعًا مكافئًا. حين يكون أحد المذنَّبات في مدار كبير على شكل القطع الناقص يؤدي المشتري إلى اضطرابه، فإنه يكتسب طاقة إضافية يمكن أن تكون كافية لأن تزيد عن تلك القيمة الحرجة. ويمكن أن يؤدي اقتراب المذنَّب من كوكب خارجي إلى إضافة المزيد من الطاقة أيضًا من خلال تأثير المقلاع: يسرق المذنَّب بعضًا من طاقة الكوكب، لكنَّ الكوكب ضخم للغاية فلا يلاحَظ. وبهذه الطريقة، يمكن أن يصبح المدار على شكل القطع الزائد.

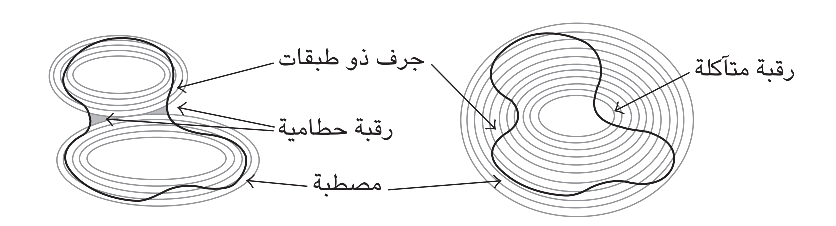
من غير المرجح أن يتخذ المدار شكل القطع المكافئ؛ لأنه يستلزم أن يكون الجسم عند القيمة الحرجة للطاقة تمامًا. ولهذا السبب بالتحديد، كثيرًا ما كانت القطوع المكافئة تُستَخدم بصفتها الخطوة الأولى في حساب العناصر المدارية لأحد المذنَّبات. فالقطع المكافئ قريب من القطع الناقص والقطع الزائد على حد سواء.

يعيدنا هذا إلى مذنَّب قصير الأمد تصدَّر العناوين، يُسمى ٦٧ بي/تشوريوموف-جيراسيمنكو، على اسمي مكتشفيه: كليم تشوريوموف وسفيتلانا جيراسيمنكو. يدور هذا المذنَّب بالشمس كل ستة ونصف من الأعوام. ظل المذنَّب «٦٧ بي» في وجوده المعتاد، يتسكع حول الشمس ويُخرِج نفثات من بخار الماء الساخن إلى أن اقترب للغاية واسترعى انتباه علماء الفلك، وأُرسِلت مركبة الفضاء «روزيتا» للقائه. حين اقتربت «روزيتا» من هدفها، اتضح أنَّ «٦٧ بي» بطة مطاطية كونية؛ إذ كان على شكل كتلتين دائريتين تجمع بينهما رقبة ضيقة. في بداية الأمر، لم يكن أحد يعرف على وجه اليقين ما إذا كان هذا الشكل قد انبثق من جسمين دائريين التصقا معًا ببطء شديد، أم أنهما جسم واحد تآكل في منطقة الرقبة.

في أواخر عام ٢٠١٥، أمكن حل هذه المشكلة من خلال استخدام تطبيق مبتكر للرياضيات على صور تفصيلية للمذنَّب. تبدو تضاريس المذنَّب «٦٧ بي» للوهلة الأولى فوضوية وغير منتظمة، وبه جروف محززة ومنخفضات مسطحة تتوزع بصورة عشوائية، لكنَّ تفاصيل سطحه تقدِّم لنا بعض الإشارات عن أصوله. تخيَّل أنك أخذت بصلة وقطعت منها بعض الشرائح بصورة عشوائية، وبعض القطع الكبيرة. ستترك الشرائح الرفيعة القريبة من السطح رقعًا مسطحة، أما القطع الأكبر فستترك مكانها حفرًا أعمق تبدو منها كومة من الطبقات المنفصلة. المنخفضات المسطحة في المذنَّب تشبه الشرائح، أما الجروف

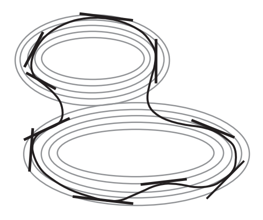
والمناطق الأخرى فغالبًا ما تبدو بها طبقات متراصة من الجليد. يمكن رؤية مجموعة الطبقات الموجودة في القمة وفي المركز، بالصورة الأولى الواردة في مقدمة هذا الكتاب على سبيل المثال، وتظهر العديد من المناطق المسطحة أيضًا.

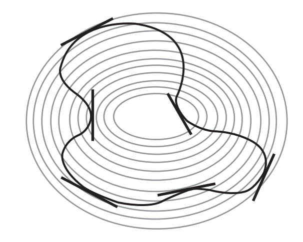
يعتقد علماء الفلك أنَّ المذنَّبات حين ظهرت لأول مرة في النظام الشمسي المبكر نمت بالتراكم؛ أي أُضيفَت طبقات الجليد تدريجيًّا واحدة تلو الأخرى، مثل طبقات البصل. ومن ثمَّ؛ يمكننا التساؤل عمَّا إذا كانت التكوينات الجيولوجية التي تظهر في صور المذنَّب «٦٧ بي»، تتفق مع هذه النظرية أم لا، وإذا كانت تتفق معها، فيمكننا استخدام الجيولوجيا لإعادة بناء تاريخ المذنَّبات.



تصوران متنافسان لتفسير بنية المذنَّب «٦٧ بي». على اليسار: نظرية التصادم. على اليمين: نظرية التآكل.

نفَّذ ماتيو ماسيروني وزملاؤه هذه المهمة عام ٢٠١٥.[1] وتقدِّم النتائج التي توصلوا إليها دليلًا قويًّا يؤيد نظرية أنَّ شكل البطة قد نتج عن اصطدام لطيف. تتمثَّل الفكرة الأساسية في أنَّه يمكن استنتاج تاريخ المذنَّب من خلال هندسة طبقاته الجليدية. عند التحديق إلى الصور، تبدو نظرية الجسمين رهانًا أفضل، لكنَّ ماسيروني وفريقه قد أجروا تحليلًا رياضيًّا دقيقًا باستخدام الهندسة الثلاثية الأبعاد، والإحصائيات، والنماذج الرياضية لمجال جاذبية المذنَّب. من خلال البدء بتمثيل رياضي لشكل المذنَّب المرصود وسطحه، توصَّل الفريق أولًا إلى مواقع ١٠٣ من المستويات وتوجهاتها، وكل منها يتلاءم على النحو الأمثل بسمة جيولوجية ترتبط بالطبقات المرصودة، مثل المصطبة (منطقة مسطحة) أو النجد (نوع من المنحدرات). ووجد الفريق أنَّ هذه المستويات تتلاءم معًا بانتظام حول كلٍّ من الفصين، لكنها لا تتلاءم عند الرقبة حيث يتحد الفصان. يشير هذا إلى أنَّ كلًّا من الفصين قد اكتسب طبقاته الشبيهة بالبصل في أثناء نموه قبل أن يقتربا ويلتصقا.





رسم تخطيطي للمستويات التي تتلاءم على النحو الأنسب مع المصاطب والنُّجُد. على اليسار: نظرية الاصطدام. على اليمين: نظرية التآكل. أُجريت الحسابات الفعلية في ثلاثة أبعاد باستخدام إجراء إحصائي لأفضل مطابقة، واستخدم ١٠٣ من المستويات.

حين تتشكَّل الطبقات، تكون متعامدة تقريبًا على الاتجاه المحلي للجاذبية، وتلك هي الطريقة التقنية للقول إنَّ المادة الإضافية تسقط «لأسفل». ولمزيد من التأكيد، قام الفريق بحساب مجال جاذبية المذنَّب وفقًا لكلتا الفرضيتين، واستخدم طرقًا إحصائية لإثبات أنَّ الطبقات تلائم نموذج الاصطدام على نحو أفضل.

بالرغم من أنَّ المذنَّب «٦٧ بي» يتكوَّن بصفة أساسية من الجليد، فهو أسود كالليل الحالك، ومنقَّر بآلاف الصخور. حقق المسبار «فايلي» هبوطًا صعبًا، ومؤقتًا أيضًا مثلما اتضح، على رأس البطة. لم يَسِر أمر الهبوط مثلما كان مخططًا له. تضمنت معدات «فايلي» محركًا صاروخيًّا صغيرًا، وأوتادًا بمسامير لولبية، وحرابًا ولوحًا شمسيًّا. كانت الخطة هي تحقيق هبوط لطيف، وإطلاق الصاروخ كي يظل المسبار ثابتًا على سطح المذنَّب، وتثبيت المذنَّب بالحراب كي يبقى في مكانه بعد توقُّف الصواريخ، وغرس الأوتاد في المذنَّب للتأكد من بقائه في مكانه، ثم استخدام اللوح الشمسي لتوليد الطاقة من ضوء الشمس. وبالرغم من استخدام أفضل الخطط والاستعانة بأفضل الموارد البشرية، لم ينطلق الصاروخ، ولم تثبت الحراب، ولم تنغرس المسامير اللولبية؛ ونتيجةً لذلك كله، انتهى المطاف بوقوع اللوح الشمسي في ظل عميق دون جمع أي قدْر يُذكر من ضوء الشمس يمكن توليد الطاقة منه.

وبالرغم من «هبوطها المثالي ثلاثي النقاط: ركبتان وأنف»، الذي كان مضرب الأمثال، فقد حقق «فايلي» جميع أهدافه العلمية تقريبًا، وأرسل بيانات مهمة. وقد كان المرجو أن يتمكن من إرسال المزيد؛ إذ اقترب المذنَّب من الشمس، وصار الضوء أقوى، واستيقظ المسبار من سباته الإلكتروني. جدَّد «فايلي» الاتصال مع وكالة الفضاء الأوروبية لفترة

وجيزة، لكنَّ الاتصال فُقِد مجددًا بسبب زيادة نشاط المذنَّب التي أتلفته على الأرجح. قبل أن تنفد طاقة «فايلي»، كان قد أكد لنا أنَّ سطح المذنَّب يتكوَّن من جليد مغطًّى بطبقة من الغبار الأسود. وأرسل أيضًا مثلما ذكرنا من قبل، قياسات توضح أنَّ نسبة الديوتيريوم الموجودة في الجليد، أكبر من تلك الموجودة في محيطات الأرض؛ مما يلقي بشكوك جدية على النظرية القائلة بأنَّ مياه محيطات الأرض قد أتت من المذنَّبات في أثناء تشكُّل النظام الشمسي.

قدَّمت لنا الأعمال المبتكرة التي استُخدِمت فيها البيانات التي وصلت إلى أرض الوطن مزيدًا من المعلومات المفيدة. فعلى سبيل المثال، يوضح التحليل الرياضي لكيفية انضغاط دعامات هبوط «فايلي»، أنَّ قشرة المذنَّب قاسية في بعض المناطق، لكن السطح أرق في الأماكن الأخرى. تتضمن الصور التي التقطها «روزيتا»، ثلاث علامات لأول أماكن اصطدمت فيها المركبة الفضائية بالمذنَّب على عمق كافٍ لتوضح أنَّ المادة الموجودة هناك لينة نسبيًّا. لم تتمكن المطرقة التي كانت على متن «فايلي» من اختراق الجليد في المكان الذي استقرت فيه؛ ومن ثمَّ فالأرض هناك صلبة. غير أنَّ القدر الأكبر من المذنَّب «٦٧ بي» مسامية للغاية؛ فثلاثة أرباع باطنه فضاء فارغ.

أرسل المسبار «فايلي» بعض العينات الكيميائية المثيرة للاهتمام أيضًا: العديد من المركبات العضوية البسيطة (والمقصود بعضوية أنها كربونية، ولا تشير إلى إمكانية وجود حياة)، ومركبًا واحدًا أكثر تعقيدًا هو بوليمر أوكسي الميثلين، الذي تشكَّل على الأرجح من جزيء الفورمالديهايد الأبسط بفعل ضوء الشمس. ذُهِل علماء الفلك من أحد الاكتشافات الكيميائية للمسبار «روزيتا»، وهو وجود الكثير من جزيئات الأكسجين في غيمة الغاز المحيطة بالمذنَّب.[2] لقد كانت دهشتهم عظيمة للغاية حتى إنهم اعتقدوا في بداية الأمر أنهم قد أخطئوا. فالنظريات التقليدية عن نشأة النظام الشمسي تقول بأنَّ الأكسجين كان سيسخُن مما يؤدي إلى تفاعله مع غيره من العناصر لتكوين مركبات مثل ثاني أكسيد الكربون؛ ومن ثمَّ فلن يكون موجودًا في صورة أكسجين خالص. لا بد وأنَّ النظام الشمسي المبكر كان أقل عنفًا مما كان يُعتَقد عنه سابقًا، وهو ما يسمح لذرات الأكسجين الصلبة بالتراكم ببطء وتفادي تكوين المركبات.

إنَّ هذا لا يتعارض مع الأحداث الدرامية التي يُعتَقد أنها قد حدثت في أثناء تكوُّن النظام الشمسي مثل هجرة الكواكب وتصادم الجسيمات الكوكبية، لكنه يشير إلى أنَّ مثل هذه الأحداث كانت نادرة نسبيًّا، مؤكِّدًا على وجود أساس من النمو البطيء اللطيف.

من أين تأتي المذنَّبات؟

لا يمكن للمذنَّبات الطويلة الأمد أن تبقى في مداراتها الحالية إلى الأبد. ففي أثناء مرورها بالنظام الشمسي، يوجد خطر بالتصادم أو الاقتراب الوشيك الذي يقذف بها إلى الفضاء دون عودة. ربما يكون الاحتمال ضئيلًا، لكن الاحتمال بتفادي مثل هذه الكوارث يزداد مع وجود الملايين من المدارات. ثم إنَّ المذنَّبات تتضاءل وتفقد من كتلتها في كل مرة تدور فيها بالشمس؛ فتمر بينما يتصعد منها الجليد. إذا ظلت في المدار لفترة طويلة، فإنها سوف تذوب.

في عام ١٩٣٢، اقترح إرنست أوبك مخرجًا: لا بد أنه يوجد مستودع ضخم من الجسيمات الكوكبية الجليدية في الأماكن الخارجية من النظام الشمسي، تجدِّد إمداد المذنَّبات. وتوصَّل جان أورط إلى هذه الفكرة نفسها بصفة مستقلة في عام ١٩٥٠. من حين إلى آخر، يتزحزح أحد هذه الأجسام الجليدية عن مكانه، ربما بسبب الاصطدامات التي كادت تحدث مع مذنَّبات أخرى، أو بسبب اضطرابات الجاذبية. يغير بعد ذلك مداره مقتربًا من الشمس، فتزيد درجة حرارته وتُولَد الذؤابة والذيل المميزان للمذنَّبات. درس أورط هذه الآلية بتفصيل رياضي كبير؛ ولهذا فإننا نسمي المصدر الآن بسحابة أورط، تكريمًا له. (ومثلما شرحنا من قبل في حالة الكويكبات، ينبغي ألا نفهم الاسم حرفيًّا. فهي سحابة متناثرة للغاية.)

يعتقد العلماء أنَّ سحابة أورط تشغل حيزًا كبيرًا حول الشمس يتراوح من ٥٠٠٠ وحدة فلكية إلى ٥٠٠٠٠ وحدة فلكية (من ٠٫٠٣ سنة ضوئية إلى ٠٫٧٩ سنة ضوئية). تمتد السحابة الداخلية إلى ٢٠٠٠٠ وحدة فلكية، وهي حلقة تتوازى مع مدار الشمس على نحوٍ تقريبي، أما الهالة الخارجية فهي قشرة كروية. توجد التريليونات من الأجسام التي يبلغ قطرها كيلومترًا واحدًا أو أكثر في الهالة الخارجية، وتضم السحابة الداخلية مئات أضعاف ذلك العدد. تبلغ الكتلة الإجمالية لسحابة أورط خمسة أضعاف كتلة الأرض تقريبًا. والحق أنَّ العلماء لم يرصدوا هذه البنية؛ بل استنتجوها من الحسابات الرياضية.

تشير نماذج المحاكاة وغيرها من الأدلة إلى أنَّ سحابة أورط قد ظهرت للوجود حين بدأ القرص الكوكبي البدائي المحلي في الانهيار؛ ومن ثمَّ تكوين النظام الشمسي. وقد ناقشنا الأدلة التي تؤيد أنَّ الجسيمات الكوكبية الناتجة كانت أقرب إلى الشمس في الأصل، ثم دفعتها الكواكب العملاقة إلى المناطق الخارجية الأبعد عن الشمس. ربما تكون سحابة أورط من بقايا النظام الشمسي المبكر وقد تكوَّنت من الغبار المتبقي. أو ربما تكون نتيجة

التنافس بين الشمس والنجوم المجاورة لجذب مواد دائمًا ما كانت على هذه الدرجة من البعد، بالقرب من الحد الذي يلغي عنده مجالا جاذبية النجمين أحدهما الآخر. أو ربما يكون الأمر على النحو الذي اقترحه هارولد ليفيسون وزملاؤه في عام ٢٠١٠، وهو أنَّ الشمس سرقت الغبار من مجموعة الأقراص الكوكبية البدائية التي تقع في جوارها ويبلغ عددها ٢٠٠ تقريبًا.

إذا كانت نظرية الطرد صحيحة، فقد كانت المدارات الأولية لأجرام سحابة أورط إهليلجيةً طويلة للغاية ورفيعة. غير أنه لما كانت هذه الأجرام تبقى في السحابة غالبًا، فلا بد أنَّ مداراتها قد اتسعت الآن كثيرًا، وصارت دائرية تقريبًا. ويُعتَقد بأنَّ المدارات قد اتسعت بسبب التفاعل مع النجوم القريبة والمد المجري، وهو تأثير الجاذبية الإجمالي للمجرة.

تختلف المذنَّبات القصيرة الأمد عن ذلك، ويعتقد العلماء أنَّ منشأها مختلف أيضًا، ويتمثل في حزام كايبر والقرص المبعثر.

حين اكتُشِف بلوتو، ووجد علماء الفلك أنه صغير إلى حدٍّ ما، تساءل العديد منهم عمَّا إذا كان من الممكن أن يكون جسمًا آخرَ من نوع سيريس: أول جسم جديد في حزام ضخم يضم آلاف الأجسام. أحد هؤلاء، وإن لم يكن أولهم، هو كينيث إدجورث الذي اقترح عام ١٩٤٣ أنه حين تكثَّف النظام الشمسي الخارجي فيما بعد نبتون، من سحابة الغاز الأولية، لم تكن المادة كثيفة بما يكفي لتشكيل كواكب كبيرة. وكان يرى أيضًا أنَّ هذه الأجسام مصدر محتمل للمذنَّبات.

في عام ١٩٥١، اقترح كايبر أنَّ قرصًا من الأجسام الصغيرة ربما يكون قد تجمَّع في تلك المنطقة في بداية تكوُّن النظام الشمسي، لكنه كان يعتقد (مثلما كان الكثيرون يعتقدون آنذاك) أنَّ بلوتو في حجم الأرض تقريبًا؛ ومن ثمَّ كان سيؤدي إلى اضطراب القرص وبعثرة محتوياته بعيدًا وعلى مسافات كبيرة. وحين اتضح وجود مثل ذلك القرص حتى الآن بالفعل، تلقَّى كايبر ذلك التشريف المثير للريبة بتسمية منطقة في الفضاء على اسمه؛ لأنه «لم» يتنبأ بها.

اكتُشِفت عدة أجرام منفردة في هذه المنطقة، وقد التقينا بها سابقًا بالفعل باسم الأجرام الوراء نبتونية. إنَّ ما أكَّد وجود حزام كايبر هو المذنَّبات. ففي عام ١٩٨٠، أجرى خوليو فرنانديز دراسة إحصائية عن المذنَّبات القصيرة الأمد. يوجد الكثير للغاية من هذه

المذنَّبات بدرجة يصعب معها أن تكون قد أتت جميعًا من سحابة أورط. من بين كل ٦٠٠ مذنَّب قد انبثقت من سحابة أورط، يصبح ٥٩٩ من المذنَّبات طويلةَ الأمد، وواحد فقط هو الذي يؤسَر بفعل كوكب عملاق، ويتغير مداره ليصبح مذنَّبًا قصير الأمد. قال فرنانديز إنه يُحتمل وجود مستودع من الأجسام الجليدية على مسافة تتراوح بين ٣٥ وحدة فلكية و٥٠ وحدة فلكية من الشمس. لاقت أفكاره تأييدًا قويًّا من سلسلة من نماذج المحاكاة التي أجراها توم كوين وسكوت تريمين عام ١٩٨٨، واللذان قد لاحظا أيضًا أنَّ المذنَّبات القصيرة الأمد غالبًا ما تبقى بالقرب من مدار الشمس، أما المذنَّبات الطويلة الأمد، فهي تصل من أي اتجاه تقريبًا. صار الاقتراح مقبولًا، وعُرِف باسم «حزام كايبر». يفضِّل بعض علماء الفلك استخدام اسم «حزام إدجورث-كايبر»، بينما لا ينسب آخرون الفضل إلى أيٍّ منهما.

لا تزال أصول حزام كايبر غامضة. تشير نماذج محاكاة النظام الشمسي المبكر إلى التصور الذي ذكرناه سابقًا، والذي يتمثَّل في أنَّ الكواكب العملاقة الأربعة التي كانت قد تشكَّلت في البداية بترتيب مختلف عمَّا هي عليه اليوم (بدايةً من الشمس إلى الخارج)، ثم انتقلت من أماكنها وهي تنثر الجسيمات الكوكبية في الاتجاهات الأربعة. طُرِحَت معظم أجسام حزام كايبر الأولى بعيدًا، لكن تبقى منها جسم واحد من كل ١٠٠. وعلى غرار سحابة أورط، اتخذ حزام كايبر شكل حلقة مغبشة أيضًا.

إنَّ توزيع المادة في حزام كايبر غير منتظم، مثلما هو الحال في حزام الكويكبات، وهو مُعدَّل بفعل مدارات الرنين، مع نبتون هذه الحالة. وثمَّة منطقة تُدعى بمنحدر كايبر، وتوجد على بُعد ٥٠ وحدة فلكية تقريبًا، حيث يقل عدد الأجسام فجأة. ما من تفسير لهذا حتى الآن، لكنَّ باتريك لياكاوا يخمِّن أنه قد يكون نتيجة لوجود جسم كبير غير مُكتشَف؛ كوكب X حقيقي.

يُعد القرص المبعثر أكثر إلغازًا وغموضًا حتى من هذا. فهو يتشابك مع حزام كايبر بدرجة طفيفة، لكنه يمتد إلى مسافة أبعد، إلى مسافة ١٠٠ وحدة فلكية، ويميل بشدة بالنسبة إلى مدار الشمس. وتتسم أجرام القرص المبعثر بمدارات شديدة الإهليلجية، وغالبًا ما تنحرف إلى النظام الشمسي الداخلي. تظل هناك لفترة طويلة بصفتها قناطير، ثم يتغير المدار مجددًا وتتحول إلى مذنَّبات قصيرة الأمد. تُعرَّف القناطير بأنها أجسام تشغل مدارات تقطع مدار الشمس بين مداري المشتري ونبتون، وهي لا تبقى إلا لبضعة ملايين من الأعوام، ويوجد منها ٤٥ ألفًا على الأرجح يزيد قطرها عن كيلومتر. تأتي غالبية المذنَّبات القصيرة الأمد على الأرجح من القرص المبعثر لا حزام كايبر.

في عام ١٩٩٣، اكتشف كلٌّ من كارولين ويوجين شوميكر، وديفيد ليفي، مذنَّبًا جديدًا سُمِّي فيما بعد باسم «شوميكر-ليفي٩». أسره المشتري على غير المعتاد، وراح يتحرك في مدار الكوكب العملاق. أشارت التحليلات التي أُجريت على مداره إلى أنَّ الأَسْر قد وقع قبل فترة تتراوح من ٢٠–٣٠ عامًا. كان مذنَّب «شوميكر-ليفي٩» استثنائيًّا من جانبين. فقد كان هو المذنَّب الوحيد الذي رُصِد دورانه بكوكب، وبدا أنه مهشم إلى قطع.

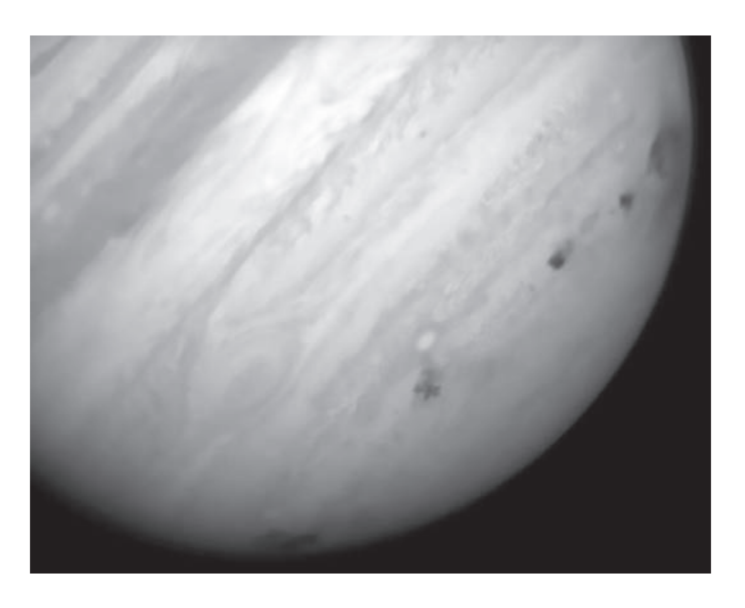


«شوميكر-ليفي٩» في ١٧ مايو ١٩٩٤.

ظهر السبب من نموذج محاكاة لمداره. فعند حساب مداره في الماضي، يتضح أنَّ المذنَّب قد مرَّ ولا بد عام ١٩٩٢، داخل حد روش للمشتري. بعد ذلك، حطمت القوى المدية للجاذبية المذنَّب، مشكِّلة خيطًا يتكوَّن من ٢٠ شظية تقريبًا. وقع المذنَّب في أَسْر المشتري في الفترة ما بين ١٩٦٠–١٩٧٠ تقريبًا، وقد أدى هذا اللقاء التقاربي إلى تشويه مداره ليصبح طويلًا رفيعًا.

تنبَّأ نموذج محاكاة المدار في المستقبل بأنَّ المذنَّب سيصطدم بالمشتري في مروره التالي به في يوليو عام ١٩٩٤. لم يرصد علماء الفلك تصادمًا فلكيًّا من قبل؛ لذا فقد سبَّب هذا الاكتشاف قدرًا كبيرًا من الإثارة. ذلك أنَّ الاصطدام سيؤدي إلى اضطراب الغلاف الجوي للمريخ مما يسمح باكتشاف المزيد عن طبقاته الأعمق التي تخبئها عادةً تلك الغيمة الموجودة فوقها. وعند وقوع الحدث، كان الاصطدام أقوى حتى مما كان متوقعًا وترك على الكوكب سلسلة من الندبات الضخمة التي خفتت تدريجيًّا، بعد أن ظلت واضحة لشهور. رُصِد واحد وعشرون اصطدامًا في المجمل، وأنتج أكبرها من الطاقة ما يعادل ٦٠٠ ضعف طاقة جميع الأسلحة الموجودة على الأرض، إن هي فُجِّرت في آنٍ واحد.

تعلَّم العلماء الكثير من الأمور الجديدة عن المشتري من الاصطدامات. أحد هذه الأمور هي دوره ككنَّاسة فلكية. ربما يكون «شوميكر-ليفي٩» هو أول مذنَّب يُرصَد دورانه



البقع الداكنة هي بعض مواقع الاصطدام من شظايا المذنَّب «شوميكر–ليفي٩».

بالمشتري، لكنَّ خمسةً على الأقل من المذنَّبات قد فعلت ذلك في الماضي، بناءً على مداراتها الحالية. كل محاولات الأسر هذه تكون مؤقتة؛ فإما أن يقع المذنَّب في أسر الشمس مددًا، أو يصطدم في نهاية المطاف مع شيءٍ ما. وتشير ثلاث عشرة من سلاسل الفُوَّهات على كاليستو وثلاثة على جانيميد إلى أنَّ ما يصطدم به المذنَّب في بعض الأحيان لا يكون المشتري. وعند الجمع بين هذه الأدلة معًا، يتضح أنَّ المشتري يكنس المذنَّبات وغير ذلك من الغبار الكوني، ويأسرها ثم يصطدم بها. إنَّ هذه الأحداث نادرة بالنسبة إلينا، لكنها معتادة بالمقياس الزمني الكوني؛ ففي كل ٦٠٠٠ عام تقريبًا، يصطدم بالمشتري مذنَّب يبلغ قطره ١٫٦ كيلومتر، وتصطدم به المذنَّبات الأصغر بوتيرة أسرع كثيرًا من ذلك.

إنَّ هذا الجانب من المشتري يساعد في حماية الكواكب الداخلية من تصادمات المذنَّبات والكويكبات، مما يؤدي إلى اقتراح بيتر وارد ودونالد براونلي في كتابهما «الأرض النادرة»[3] بأنَّ كوكبًا كبيرًا مثل المشتري يجعل كواكبه الداخلية صالحة للحياة بدرجة أكبر. من سوء حظ هذا التبرير المنطقي الجذَّاب أنَّ المشتري يخلخل أيضًا الكويكبات الموجودة في الحزام الأساسي، مما قد يؤدي إلى اصطدامها بالكواكب الداخلية. لو أنَّ المشتري كان أصغر قليلًا، لصار تأثيره الإجمالي مصيريًّا للحياة على الأرض.[4] أما في حجمه الحالي، فلا

يبدو أنَّه يقدِّم ميزة إجمالية بارزة للحياة الأرضية. إنَّ كتاب «الأرض النادرة» متناقض بشأن الاصطدامات على أية حال؛ فهو يهلل للمشتري بصفته مخلِّصنا من المذنَّبات، بينما يمتدح نزعته في خلخلة الكويكبات من أماكنها كطريقة لحث الأنظمة البيئية وتشجيع التطور الأسرع.

لقد جعل «شوميكر-ليفي٩» العديد من أعضاء مجلس النواب الأمريكيين يدركون العنف الاستثنائي الذي تسبِّبه تصادمات المذنَّبات. لقد كانت أكبر ندبات الاصطدام على المشتري في حجم الأرض تقريبًا. ما من طريقة تمكِّننا من حماية أنفسنا من تصادم بمثل هذا الحجم، بالتقنية الحالية أو حتى تقنيات المستقبل القريب، لكنَّ هذا الحدث قد ركَّز الذهن على تصادمات أقل حجمًا، سواء أكانت من مذنَّب أو كويكب، وهي تصادمات قد نتمكن من تجنُّبها إذا اتخذنا خطوات تنذرنا قبل وقوع الحدث بوقت كافٍ. وقد وجَّه مجلس النواب الأمريكي التعليمات بسرعة إلى وكالة ناسا بتصنيف جميع الكويكبات القريبة من الأرض التي يزيد قطرها عن كيلومتر واحد. وقد بلغ العدد المرصود حتى الآن ٨٧٢، ومن بينها ١٥٣ كويكبًا من المحتمل أن يصطدم بنا. تشير التقديرات إلى وجود ٧٠ كويكبًا آخر تقريبًا، لكنَّ أيًّا منها لم يُكتشَف حتى الآن.

الفصل التاسع

الفوضى في الكون

«إنَّ ذلك فوضوي للغاية.»

«الطائرة ٢: تتمة» (إيربلين تو: ذا سيكويل)

أقمار بلوتو متذبذبة.

لبلوتو خمسة أقمار. قمره شارون كُرويٌّ وكبيرٌ للغاية مقارنةً بكوكبه الرئيس، أما نيكس وهيدرا وكيربيروس وستيكس فهي كتل صغيرة الحجم وغير منتظمة. يرتبط شارون مع بلوتو في تقيُّد مدي؛ ومن ثمَّ فإنَّ أحدهما يواجه الآخر بالجهة نفسها على الدوام. غير أنَّ ذلك لا ينطبق في حالة الأقمار الأخرى. في عام ٢٠١٥، رصد التلسكوب «هابِل» تنويعات غير منتظمة في الضوء المنعكس من نيكس وهيدرا. وباستخدام نموذج رياضي من الأجسام الدوَّارة، استنتج علماء الفلك أنَّ هذين القمرين يتدحرجان ولا بد رأسًا على عقب، لكنَّهما لا يفعلان ذلك بطريقة لطيفة منتظمة. وإنما تتسم حركتهما بالفوضوية.[1]

إنَّ كلمة «فوضوي» لا تُستخدم في الرياضيات، بصفتها مصطلحًا متأنقًا لعبارة «شاذ ولا يمكن التنبؤ به». فهي تشير إلى الفوضى «الحتمية»، التي تتمثَّل على ما يبدو في سلوك غير منتظم ينتج من قوانين منتظمة تمامًا. ربما يبدو ذلك متناقضًا، لكنَّ هذه التوليفة لا مفر منها في معظم الأحيان. تبدو الفوضى عشوائية، وهي كذلك بالفعل من بعض الجوانب، لكنها تنبع من القوانين الرياضية نفسها التي تنتج السلوكيات المنتظمة التي يمكن التنبؤ بها، مثل شروق الشمس كل صباح.

تشير المزيد من قياسات «هابِل» إلى أنَّ ستيكس وكيروبيروس يدوران على نحوٍ فوضوي هما أيضًا. وقد كان التحقق من هذه النظرية هو إحدى المهام التي نفَّذها المسبار

«نيو هورايزونز» حين زار بلوتو. من المفترض أن تصل بياناته إلى الأرض على مدار فترة تبلغ ١٦ شهرًا، ولم تصل النتائج بعدُ حتى هذه اللحظة التي أكتب فيها.

تُعد أقمار بلوتو هي أحدث ما لدينا بشأن الديناميكيات الفوضوية في الكون، لكنَّ علماء الفلك قد اكتشفوا العديد من الأمثلة على الفوضى في الكون، بدءًا من التفاصيل الدقيقة بشأن أقمار ضئيلة الحجم، وحتى المستقبل البعيد للنظام الشمسي. ثمَّة مثال آخر أيضًا على الأقمار التي تدور على نحو فوضوي هو قمر زحل، هايبريون، وهو أول قمر يكتشف العلماء أنه يسيء التصرف. إنَّ محور دوران الأرض يميل بمقدار ثابت تقريبًا هو ٢٣٫٤ درجة، مما يمنحنا التتابع المنتظم للفصول، أمَّا ميل دوران محور المريخ فهو يتغير على نحوٍ فوضوي. وقد كان عطارد والزهرة على هذه الحالة من قبل أيضًا، لكنَّ التأثير المدي الذي يقع عليهما من الشمس قد أدى إلى استقرارهما.

ثمَّة رابط بين الفوضى وبين فجوة كيركوود التي توجد في حزام الكويكبات وتبلغ قيمتها ١:٣. يخلي المشتري هذه المنطقة من الكويكبات، ويقذف بها عشوائيًّا في أرجاء النظام الشمسي. بعضها يعبر مدار المريخ الذي يمكن أن يعيد توجيهها في كل مكان تقريبًا. ربما يكون هذا هو السبب الذي لاقت به الديناصورات حتفها. وقد أُسِرت عائلة كويكبات المشتري المسماة بتروجان، نتيجةً لديناميكيات فوضوية على الأرجح. علاوةً على ذلك، قدَّمت هذه الديناميكيات الفوضوية لعلماء الفلك طريقةً تمكِّنهم من تقدير عمر عائلة من الكويكبات.

إنَّ النظام الشمسي بعيد كل البعد عن كونه آلة عملاقة منتظمة كالساعة؛ بل إنه يقامر بكواكبه. اكتُشِفَت أولى دلائل ذلك على يد جيري ساسمان وجاك ويزدام عام ١٩٨٨، متمثِّلةً في اكتشاف أنَّ العناصر المدارية لبلوتو تختلف على نحوٍ غير منتظم نتيجةً لقوى الجاذبية التي تبذلها عليها الكواكب الأخرى. بعد ذلك بعام، أوضح ويزدام ولاسكار أنَّ مدار الأرض فوضوي هو أيضًا، وإن كان ذلك بدرجة أقل؛ فالمدار نفسه لا يتغير كثيرًا، غير أنه لا يمكن التنبؤ بموقع الأرض في المدار على المدى الطويل؛ أي بعد ١٠٠ مليون عام من الآن مثلًا.

أوضح ساسمان وويزدام أيضًا أنَّ عدم وجود الكواكب الداخلية كان سيؤدي بالمشتري وزحل وأورانوس ونبتون، إلى التصرُّف على نحو فوضوي على المدى الطويل. ولهذه الكواكب الخارجية تأثير كبير على جميع الكواكب الأخرى، مما يجعلها السبب الأساسي في الفوضى بالنظام الشمسي. غير أنَّ الفوضى لا تقتصر على فنائنا الخلفي

الفلكي. ذلك أنَّ الحسابات تشير أيضًا إلى أنَّ العديد من الكواكب الخارجية التي تدور بنجوم بعيدة، تتبع هي أيضًا على الأرجح مدارات فوضوية. ثمَّة فوضى فيزيائية فلكية: فخرج الضوء من بعض النجوم البعيدة يتنوع على نحو فوضوي.[2] ومن المحتمل جدًّا أن تكون حركة النجوم فوضوية هي أيضًا، وإن كان علماء الفلك عادةً ما يصفون مداراتها بأنها دائرية (انظر الفصل الثاني عشر).

يبدو أنَّ الفوضى تحكم الكون. بالرغم من ذلك، فقد وجد علماء الفلك أنَّ السبب الأساسي في الفوضى غالبًا ما يكون مدارات الرنين؛ تلك الأنماط العددية البسيطة. مثال ذلك فجوة كيركوود التي تبلغ نسبتها ١:٣. من ناحية أخرى، تُعد الفوضى مسئولة عن الأنماط هي أيضًا، ويمكن أن تكون الأشكال الحلزونية للمجرات مثالًا جيدًا على ذلك، مثلما سنرى في الفصل الثاني عشر.

النظام يخلق فوضى، والفوضى تخلق نظامًا.

ما من ذاكرة للأنظمة العشوائية. فحين ترمي النرد،[3] لا يخبرك العدد الذي يظهر في أول رمية بأي شيء عمَّا سيظهر في الرمية الثانية. ربما يكون هو العدد نفسه الذي ظهر في المرة الأولى، وربما لا يكون كذلك. لا تصدِّق أي شخص يحاول إخبارك بأنَّ العدد ٦ إذا لم يظهر على نردٍ ما لفترة طويلة، فإنَّ «قانون المتوسطات» يجعل ظهوره أكثر ترجيحًا. ما من وجود لمثل ذلك القانون. صحيح أنه على المدى الطويل ينبغي أن تكون نسبة العدد ٦ في نردٍ متساوٍ تبلغ ١/٦، لكنَّ ذلك يحدث لأنَّ العدد الكبير للرميات الجديدة يغطي على أية تباينات، لا لأنَّ النرد يقرِّر بأن يصل إلى ما يقول المتوسط النظري بوجوب حدوثه.[4]

على العكس من ذلك، تمتلك الأنظمة الفوضوية ما يشبه ذاكرة قصيرة المدى. فما تفعله الآن يقدِّم بعض المعلومات عمَّا ستفعله بعد قليل في المستقبل. ومن المفارقات أنه إذا كان النرد فوضويًّا، فإنَّ عدم ظهور العدد ٦ لوقت طويل، سيكون دليلًا على أنه «لن» يظهر في وقت قريب على الأرجح.[5] إنَّ الأنظمة الفوضوية تنطوي على الكثير من التكرارات الفوضوية في سلوكها؛ ومن ثمَّ يُعد الماضي دليلًا ملائمًا للمستقبل القريب، وإن لم يكن مؤكدًا على الإطلاق.

يُدعى الطول الزمني الذي يظل هذا النوع من التوقُّع صالحًا له باسم أفق التنبؤ، (والمصطلح التقني: زمن ليابونوف.) وكلما زادت دقةُ ما تعرفه عن الحالة الحالية لنظام ديناميكي فوضوي، زاد طول أفق التنبؤ، لكنَّ الأفق يزيد بدرجة أبطأ كثيرًا من تلك التي

تزيد بها دقة القياسات. فمهما بلغت دقتها، فإنَّ أهون خطأ في الحالة الحالية يزداد حجمه للغاية في نهاية المطاف حتى إنه يغمر التنبؤ. لاحظ عالم الطقس إدوارد لورنز هذا السلوك في نموذج بسيط حفَّزه الطقس، وينطبق الأمر نفسه على نماذج الطقس المعقدة التي يستخدمها مَن يقومون بالتوقعات. إنَّ حركة الغلاف الجوي تتبع قواعد رياضية محددة لا مكان فيها للعشوائية، غير أننا نعلم جميعًا كيف يمكن لتوقعات الطقس أن تغدو غير جديرة بالثقة بها بعد بضعة أيام فحسب.

وهذا هو ما يعبِّر عن مصطلح تأثير الفراشة الشهير الذي صكَّه لورنز (والذي يُفهم على نحوٍ خاطئ في معظم الأحيان)، ويقول بأنَّ خفقة من جناح فراشة يمكن أن تسبِّب إعصارًا بعد شهر في النصف الآخر من العالم.[6]

إذا كنت تعتقد أنَّ ذلك غير منطقي، فأنا لا ألومك. ذلك أنه لا ينطبق إلا بمعنًى خاص للغاية. ويكمن المصدر الأساسي المحتمل لسوء الفهم في كلمة «تسبِّب». فمن الصعب إدراك أنَّ خفقة جناح فراشة يمكن أن تخلق الطاقة الضخمة في إعصار. والإجابة هي أنَّها لا تفعل ذلك. فطاقة الإعصار لا تأتي من الخفقة؛ بل أُعيد توزيعها من مكان آخر، حين تتفاعل الخفقة مع بقية نظام الطقس الذي لم يتغير فيما سوى ذلك.

وبعد الخفقة، لا نحصل على الطقس نفسه الذي كان موجودًا من قبل باستثناء الإعصار الإضافي فحسب. وإنما يتغير نمط الطقس بأكمله على مستوى العالم. يكون التغيير صغيرًا في البداية، لكنه ينمو، وذلك في «الاختلاف» عمَّا كان سيحدث بدلًا مما حدث، وليس في الطاقة. وبسرعة يصبح هذا الاختلاف كبيرًا ولا يمكن التنبؤ به. إن كانت الفراشة قد خفقت بجناحيها بعد ذلك بثانيتين، كان يمكن أن «تتسبَّب» بدلًا من ذلك في إعصار قمعي في الفلبين عاضت عنه عواصف ثلجية على سيبيريا. أو ربما شهر من الطقس المستقر في الصحراء.

يطلِق الرياضيون على هذا التأثير اسم «الاعتماد الحسَّاس على الشروط الابتدائية». ففي الأنظمة الفوضوية، تؤدي المدخلات التي تختلف اختلافًا طفيفًا للغاية، إلى مخرجات تختلف بمقدار كبير. إنَّ هذا التأثير فعلي وشائع للغاية. فهو السبب مثلًا في أنَّ عجن العجينة يؤدي إلى مزج المكونات جيدًا. في كل مرة تُمَط فيها العجينة تتحرك حبات الدقيق القريبة إلى مكان بعيد. وعند ثنيها مجددًا لكيلا تفلت من المطبخ، ربما ينتهي الأمر بحبات الدقيق البعيدة بعضها عن بعض، بأن تقترب (وربما لا يحدث ذلك). إنَّ المطَّ الموضعي، مع الثني، يخلق الفوضى.

إنَّ هذا الوصف ليس مجازيًّا فحسب؛ بل هو وصف باللغة العادية للآلية الرياضية الأساسية التي تولِّد ديناميكيات فوضوية. فمن الناحية الرياضية، يُعد الغلاف الجوي شبيهًا بالعجينة. ذلك أنَّ القوانين الفيزيائية التي تحكم الطقس «تمط» حالة الغلاف الجوي موضعيًّا، لكنَّ الغلاف الجوي لا يفلت من الكوكب؛ لذا فإنَّ حالته «تنثني مجددًا» على نفسها. ولهذا، إذا استطعنا تشغيل طقس الأرض مرتين مع الاختلاف الوحيد المتمثل في وجود «خفقة» ابتدائية أو «عدم وجود خفقة»، فسنجد أنَّ السلوكيات الناتجة تختلف اختلافًا تصاعديًّا. سيظل الطقس طقسًا، لكنه سيكون طقسًا مختلفًا.

إننا لا نستطيع تشغيل الطقس الفعلي مرتين في واقع الأمر، لكنَّ هذا هو ما يحدث تحديدًا في التوقعات الجوية باستخدام النماذج التي تعكس الفيزياء الجوية الحقيقية. وعند إجراء تغييرات طفيفة للغاية في الأعداد التي تمثِّل الحالة الحالية، وإدخالها في المعادلات التي تتنبأ بالحالة المستقبلية، فإنَّ ذلك يؤدي إلى تغييرات واسعة النطاق في التوقع. يمكن على سبيل المثال في أحد نماذج المحاكاة، أن نستبدل بمنطقة من الضغط المرتفع على لندن، منطقة من الضغط المنخفض في مدينة أخرى. والطريقة الحالية للتغلب على هذا التأثير المزعج، هو إجراء العديد من نماذج المحاكاة مع إدخال اختلافات عشوائية صغيرة في الظروف الأولية، واستخدام النتائج للتوصل إلى نتائج كمية بشأن مدى ترجيح التنبؤات المختلفة. وهذا هو ما تعنيه عبارة «احتمال ٢٠٪ بحدوث العواصف الرعدية».

لا يمكن من الناحية العملية التسبُّب في حدوث إعصار محدد باستخدام فراشة مدرَّبة على النحو الملائم؛ لأنَّ توقُّع تأثير الخفقة يخضع أيضًا لأفق التنبؤ نفسه. بالرغم من ذلك، ففي سياقات أخرى مثل نبض القلب، يمكن لهذا النوع من «التحكم الفوضوي» أن يوفِّر طريقة فعالة لتحقيق سلوك ديناميكي مرغوب فيه. وسنرى العديد من الأمثلة الفلكية على ذلك في الفصل العاشر، في سياق بعثات الفضاء.

ألم تقتنع بعد؟ ثمَّة اكتشاف حديث بشأن النظام الشمسي يجعل الأمر واضحًا للغاية. لنفترض أنَّ قوة فضائية فائقة يمكن أن تعيد تشغيل تكوُّن النظام الشمسي من غيمة الغاز البدائية، باستخدام الحالة الابتدائية نفسها باستثناء «جزيء إضافي واحد» من الغاز. فما مدى الاختلاف الذي سيكون عليه النظام الشمسي اليوم؟

ربما تعتقد أنَّ الاختلاف لن يكون كبيرًا. غير أنه يجدر بك أن تتذكَّر تأثير الفراشة. لقد أثبت الرياضيون أنَّ الجزيئات المتقافزة في الغاز تكون فوضوية؛ لذا فلن يكون غريبًا

أن ينطبق الأمر نفسه على غيوم الغاز المنهارة، حتى وإن اختلفت التفاصيل من الناحية التقنية. ولمعرفة ذلك، أجرى فولكر هوفمان وزملاء له محاكاة لديناميكيات قرصٍ من الغاز في مرحلة يحتوي فيها على ٢٠٠٠ من الجسيمات الكوكبية، مع متابعة الكيفية التي تؤدي بها التصادمات إلى تراكم هذه الأجسام لتصبح كواكب.[7] قارنوا النتائج بنموذجي محاكاة يتضمنان عملاقين غازيين، مع اختيارين مختلفين لمداريهما. وقد أجروا كلًّا من هذه التصورات الثلاثة اثنتي عشرة مرة، مع إدخال تغييرات طفيفة على الظروف الأولية. استغرق إجراء كل مرة من المرات شهرًا على كمبيوتر فائق.

لقد وجدوا أنَّ تصادمات الجسيمات الكوكبية فوضوية، مثلما كان متوقعًا. ووجدوا أنَّ تأثير الفراشة كبير للغاية؛ فتغيير الموقع الابتدائي لجسيم كوكبي واحد وبمقدار ملِّيمتر واحد فقط، يؤدي إلى ظهور نظام مختلف تمامًا من الكواكب. واستنباطًا من هذه النتيجة، يعتقد هوفمان أنَّ إضافة جزيء واحد من الغاز إلى نموذج دقيق للنظام الشمسي الوليد (إن كان شيء كهذا ممكنًا)، ستؤدي إلى تغيير الناتج بدرجة كبيرة يتعذَّر معها تكوُّن الأرض.

لقد انتهى أمر الكون الآلي المنتظم كالساعة.

قبل أن ننجرف في مدى صعوبة تحقُّق احتمالية وجودنا وفقًا لهذه النتائج، واستدعاء يد العناية الإلهية، يجب أن نأخذ في الاعتبار جانبًا آخر من الحسابات. فبالرغم من أنَّ كل مرة تؤدي إلى كواكب بأحجام مختلفة ومدارات مختلفة، يتضح أنَّ «جميع» الأنظمة الشمسية التي تنشأ من تصوُّر معيَّن، تكون متشابهة للغاية بعضها مع بعض. بدون أي عمالقة غازية، نحصل على ١١ كوكبًا صخريًّا معظمها أصغر من الأرض. ومع إضافة العمالقة الغازية، وهو نموذج أكثر واقعية، نحصل على أربعة كواكب صخرية تتراوح كتلها بين نصف كتلة الأرض وما يزيد عن كتلة الأرض قليلًا. وهذا النموذج قريب للغاية من النموذج الفعلي. فبالرغم من أنَّ تأثير الفراشة يغيِّر العناصر المدارية، تبقى البنية الكلية كما كانت عليه من قبل بدرجة كبيرة للغاية.

يحدث الأمر نفسه في نماذج الطقس. تحدث «الخفقة»؛ فيصبح الطقس العالمي مختلفًا عمَّا كان سيصير عليه، لكنه لا يزال «طقسًا». فلا يحدث مثلًا أن تجد فيضاناتٍ ضخمةً من النيتروجين السائل أو عاصفة من الضفادع الضخمة. ومن ثمَّ، فبالرغم من أنَّ نظامنا الشمسي لم يكن ليظهر بشكله الحالي «بالضبط»، إن كانت غيمة الغاز الابتدائية قد اختلفت أقل الاختلاف، كان سيظهر بدلًا منه شيء مشابه له للغاية. وإذن لأصبح احتمال تطور كائنات حية بدرجة الترجيح نفسها تقريبًا.

يمكن استخدام أفق التنبؤ في بعض الأحيان لتقدير عمر نظام فوضوي من الأجرام الفضائية؛ لأنه يحكم سرعة تهشُّم النظام وتفرُّقه. تُعد عائلات الكويكبات من أمثلة تلك الأنظمة. يمكن تمييز هذه العائلات بسبب التشابه الشديد في العناصر المدارية لدى أفرادها. يعتقد العلماء أنَّ السبب في تشكُّل كلٍّ من هذه العائلات هو تهشُّم جسم كبير واحد في مرحلةٍ ما بالماضي. وفي عام ١٩٩٤، استخدم هذه الطريقة أندريا ميلاني وباولو فاريتلا، لاستنتاج أنَّ عمرَ عائلة كويكبات «فيريتاس» يبلغ ٥٠ مليون عام على أكثر تقدير.[8] تتمثَّل العائلة في عنقود مكتظ من الكويكبات المرتبطة بالكويكب «٤٩٠ فيريتاس»، وهي تقع باتجاه خارج الحزام الأساسي، وداخل المدار الرنيني مع المشتري، والذي تبلغ نسبته ٢:١. توضح الحسابات التي أجراها ميلاني وفاريتلا أنَّ مدارَي اثنين من الكويكبات في هذه العائلة على درجة كبيرة من الفوضوية، وقد تشكَّلا نتيجة رنين مؤقت مع المشتري بنسبة ٢١:١٠. يشير أفق التنبؤ إلى أنَّ هذين الكويكبين لم يكن لهما أن يظلا بالقرب من أحدهما الآخر لأكثر من ٥٠ مليون عام، وتشير أدلة أخرى إلى أنهما فردان أصليان من عائلة «فيريتاس».

كان أول مَن أدرك وجود الفوضى الحتمية وتوصَّل إلى تلميحٍ عن سبب حدوثها، هو الرياضي العظيم هنري بوانكاريه. كان في منافسة على جائزة رياضية عرضَها الملك أوسكار الثاني، ملك النرويج والسويد، طلبًا لحل معضلة الأجسام الثلاثة في جاذبية نيوتن. وقد نصَّت قواعد الجائزة على نوع الحل المطلوب. لم يكن المطلوب صيغة مثل صيغة القطع الناقص لكيبلر؛ إذ كان الجميع مقتنعين بأنه ما من وجود لشيء كهذا؛ بل «تمثيل لإحداثيات كل نقطة في صورة سلسلة [لا نهائية] في متغير هو دالة معروفة للزمن وتتقارب السلسلة بالشكل نفسه مع جميع قيمه».

اكتشف بوانكاريه أنَّ المهمة نفسها مستحيلة بصفة جوهرية، حتى وإن كانت الأجسام الثلاثة تحت ظروف مقيدة للغاية. وكانت طريقته في إثبات هذا هو توضيح أنَّ المدارات يمكن أن تكون ما نطلق عليه اليوم مصطلح «فوضوية».

لقد ثبت أنَّ المعضلة العامة لأي عدد من الأجسام أمر صعب للغاية حتى على بوانكاريه. لقد تناول الحالة: ن = ٣. وقد عمل في واقع الأمر على ما أسميته في الفصل الخامس بمعضلة الجسمين ونصف. يمكن أن يكون الجسمان هما كوكب وقمره مثلًا، ونصف الجسم هو ذرة من الغبار خفيفة للغاية حتى إنها تستجيب لمجالي جاذبية

الجسمين، لكنها لا تبذل «عليهما» أي تأثير على الإطلاق. ينبثق عن هذا النموذج توليفة جميلة لديناميكيات منتظمة للغاية للجسمين الضخمين، وسلوك شديد العشوائية لجسيم الغبار. ومن الغريب أنَّ انتظام سلوك الجسمين الضخمين هو ما يجعل سلوك جسيم الغبار جنونيًّا.

إنَّ مصطلح «الفوضى» يجعل الأمر يبدو كما لو أنَّ مدارات أجسام ثلاثة أو أكثر، عشوائية تفتقر إلى البنية لا يمكن التنبؤ بها، ولا تحكمها أية قوانين. والواقع أنَّ جسيم الغبار يدور ويدور في مسارات منتظمة على شكل أقواس القطع الناقص، لكنَّ شكل القطع الناقص يستمر في التغير دون نمط واضح. خطرت احتمالية الفوضى على ذهن بوانكاريه حين كان يفكِّر في ديناميكيات ذرة الغبار حين يتصادف أن تقترب من مدار دوري. كان ما توقَّعه هو توليفة من الحركات الدورية لها فترات مختلفة، مثلما يحدث حين تدور كبسولة بالقمر، بالأرض أيضًا وبالشمس، في فترات مختلفة من الوقت في كل مرة. بالرغم من ذلك، فمثلما نصَّت قواعد المسابقة بالفعل، كان المتوقَّع أن يكون الحل على شكل «سلسلة» تتضمن العديد من الحركات الدورية، لا ثلاثة فقط.

توصَّل بوانكاريه إلى هذه السلسلة. فكيف تظهر الفوضى إذن؟ إنها لا تظهر نتيجة للسلسلة؛ بل بسبب عيب في الفكرة بأكملها. لقد نصَّت القواعد على أنَّ السلسلة لا بد أن «تتقارب». وهو شرط تقني رياضي لكي يكون أي مجموع لا نهائي منطقيًّا. معنى ذلك بصفة أساسية أنَّ مجموع السلسلة ينبغي أن يقترب أكثر فأكثر إلى أن يصل إلى عددٍ محدَّد، مع تضمين المزيد والمزيد من الحدود. كان بوانكاريه يقظًا للشَّرَك، وأدرك أن سلسلته لن تتقارب. بدا أولًا أنها تقترب وتقترب من عدد محدَّد، لكنَّ المجموع بدأ بعد ذلك في الابتعاد عن ذلك العدد المحدَّد بكميات أكبر كثيرًا. يُعد هذا السلوك من خصائص السلسلة «التقاربية». يمكن أن تكون السلسلة التقاربية مفيدة أحيانًا في بعض الأغراض العملية، لكنها أشارت في هذه الحالة إلى وجود عائق أمام الحصول على حل حقيقي.

ولكي يعرف بوانكاريه ماهية هذا العائق، هجر الصيغ والسلاسل، ولجأ إلى الهندسة. كان يعالج الموقع والسرعة المتجهة كليهما؛ لذا فإنَّ الخطوط المحيطية هي أجسام ثلاثية الأبعاد حقًّا، وليست منحنيات. يتسبَّب هذا في تعقيدات إضافية. فحين فكَّر بوانكاريه في الترتيبات الهندسية لجميع المدارات المحتملة بالقرب من مدار دوري، أدرك أنَّ مدارات عديدة لا بد أن تكون متشابكة للغاية وغير منتظمة. كان السبب يكمن في زوج مميز من المنحنيات يحدِّد اقتراب المدارات القريبة من المدار الدوري أو ابتعادها عنه. إذا

تقاطعت هذه المنحنيات بعضها مع بعض في نقطةٍ ما، فإنَّ السمات الرياضية الأساسية للديناميكيات (تفرد حلول معادلة تفاضلية لظروف ابتدائية محدَّدة)، تقضي بأنها ستتقاطع ولا بد في نقاط عديدة على نحوٍ لا نهائي، فتشكِّل بذلك شبكة متشابكة. بعد ذلك بفترة قصيرة، وصف الهندسة في كتابه «طرق جديدة للميكانيكا الفلكية»، على النحو التالي:

> إنها تشبه تعريشة أو نسيجًا أو شبكة من الوشائج الشديدة الضيق؛ حيث لا يمكن للمنحنيَين أن يتقاطع أحدهما مع نفسه، لكن لا بد للواحد منهما أن ينثني على نفسه بطريقة معقَّدة للغاية لكي يتداخل مع جميع وشائج النسيج عددًا لا نهائيًّا من المرات. يُذهل المرء من تعقيد هذه الصورة التي لن أحاول حتى رسمها.

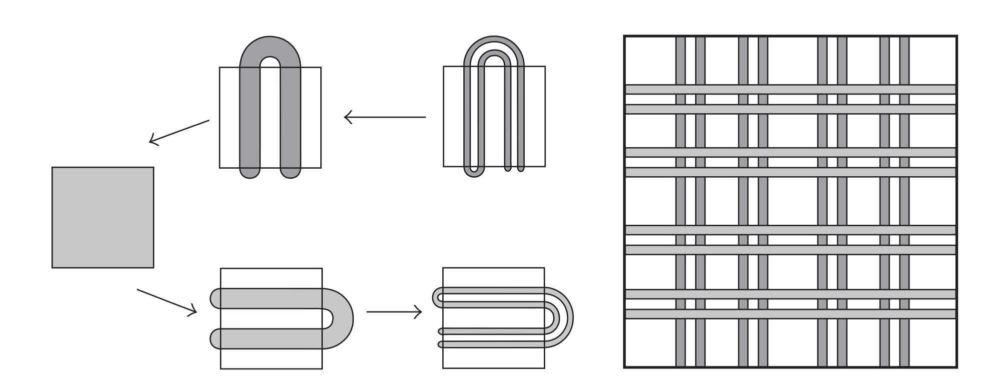
إننا نسمي هذه الصورة اليوم تشابكًا متماثلًا. ولنتجاهل مصطلح «تشابك تماثلي» (التعريف: مدار يمر بنقطة اتزان ثم يعود إليها ثانية فيضمها إلى نفسها)، ونركِّز على مصطلح «تشابك» الذي هو أكثر إثارة. تشرح الصورة التالية الهندسة في تشبيه بسيط.

من المفارقات أنَّ بوانكاريه اقترب للغاية من تحقيق هذا الاكتشاف الملحمي لكنه لم يفعل. فقد اكتشفت مؤرخة الرياضيات جون بارو-جرين، في أثناء تصفُّحها لبعض المستندات في معهد ميتاج-ليفلر، أنَّ النسخة المنشورة من عمله الفائز بالجائزة، ليست بالنسخة التي كان قد تقدَّم بها.[9] فبعد أن مُنِحت الجائزة وطُبِع البحث الرسمي لكنه لم يوزَّع بعدُ، اكتشف بوانكاريه خطأً، وهو أنه قد أغفل المدارات الفوضوية. فسحب بحثه ودفع مقابل تقديم نسخة «رسمية» منقحة بدلًا من تلك التي سحبها.

استغرق الأمر بعض الوقت لاستيعاب أفكار بوانكاريه الجديدة. فقد أتى التقدُّم الكبير التالي عام ١٩١٣ حين أثبت جورج بيرخوف أنَّ «المبرهنة الهندسية الأخيرة»، هي حدسية غير مثبتة كان بوانكاريه قد استخدمها لاستنتاج وقوع المدارات الدورية في الظروف الملائمة. والآن، تُدعى هذه النتيجة باسم مبرهنة بوانكاريه-بيرخوف للنقطة الثابتة.

صار الرياضيون وغيرهم من العلماء على وعي تام بالفوضى قبل ما يقرب من ٥٠ عامًا. سار ستيفن سميل على نهج بيرخوف، وأجرى دراسة أعمق لهندسة التشابك التماثلي؛ إذ صادف المشكلة نفسها في مجال آخر من الديناميكا. وقد ابتكر نظامًا ديناميكيًّا

يتسم بالهندسة نفسها تقريبًا غير أنه يسهل تحليلها، وتُعرف باسم وحدة حصان سميل. يبدأ هذا النظام بمربع، يمطه إلى مستطيل طويل رفيع، ويثنيه على شكل حدوة الحصان، ثم يضعه ثانية فوق المربع الأصلي. إنَّ تكرار هذا التحوُّل يشبه العَجن، وهو يؤدي إلى النتائج الفوضوية نفسها. تقدِّم هندسة حدوة الحصان برهانًا صارمًا على أنَّ هذا النظام فوضوي، وأنه يتصرف في بعض الأحيان كسلسلة عشوائية من رميات العملات المعدنية، بالرغم من أنه حتمي تمامًا.



على اليسار: حدوة حصان سميل. يُطوى المربع مرارًا، فيشكِّل سلسلة من الخطوط الأفقية. وعند عكس الزمن وفرد المربع تتحول هذه الخطوط الأفقية إلى خطوط مشابهة رأسية. على اليمين: حين تتقاطع مجموعتان من الخطوط، نحصل على تشابك تماثلي. تؤدي الديناميكيات التي حدثت بسبب تكرار الطي، إلى تقافز النقاط على التشابك بصورة عشوائية فيما يبدو. يتضمن التشابك عددًا لا نهائيًّا من الخطوط.

مع اتضاح المدى الواسع للديناميكيات الفوضوية وثرائها، شجعت الإثارة المتزايدة على ظهور قدر كبير من اهتمام وسائل الإعلام، التي أطلقت على المجال برُمَّته مصطلح «نظرية الفوضى». والحق أنَّ هذا الموضوع جزء كبير ومدهش بكل تأكيد، لكنه جزء من مجال أهم في دراسة الرياضيات، يُعرف باسم الديناميكا اللاخطية.

إنَّ السلوك الغريب الذي تتسم به أقمار بلوتو، ليس سوى مثال واحد على الفوضى في الكون. لقد نشر مارك شوالتر ودوجلاس هاميلتون في عام ٢٠١٥، تحليلًا رياضيًّا يؤيد الملاحظات المحيرة التي رصدها التلسكوب «هابِل» عن أقمار بلوتو.[10] تتلخَّص الفكرة في

أنَّ بلوتو وقمره «شارون» يتصرفان كالأجرام المهيمنة في تحليل بوانكاريه، بينما تتصرف بقية الأقمار الأصغر البعيدة كذرات الغبار. غير أنها ليست أجسامًا نقطية؛ بل هي تتخذ شكل كرات الرجبي، أو ربما حتى البطاطا، ويظهر سلوكها الجنوني في صورة تقلب فوضوي. إضافةً إلى ذلك، تتسم مداراتها والمواقع التي ستوجد فيها الأقمار في هذه المدارات في أي وقت محدَّد بالفوضوية أيضًا؛ أي لا يمكن التنبؤ بها إلا إحصائيًّا. بل وتقل أكثر إمكانية التنبؤ بالاتجاه الذي سيسلكه كلٌّ من هذه الأقمار.

لم تكن أقمار بلوتو هي أولى الأقمار المتقلبة التي يُكتشَف هذا السلوك فيها. وإنما يعود ذلك الشرف إلى «هايبريون»، قمر زحل، وقد اعتقد العلماء في ذلك الوقت أنه القمر الوحيد الذي يتقلب. ففي عام ١٩٨٤، استرعى «هايبريون» انتباه كلٍّ من ويزدام وستانتون بيل وفرانسوا مينارد.[11] ذلك أنَّ أقمار النظام الشمسي تُصنَّف جميعها تقريبًا إلى فئتين. يخضع الدوران المحوري لقمر من الفئة الأولى لدرجة كبيرة من التعديل بسبب التفاعلات المدية مع كوكبه الوالِد؛ لذا يقابل القمر كوكبه بالوجه نفسه على الدوام، في رنين بين الدوران الذاتي والمداري بنسبة ١:١، يُعرف أيضًا باسم الدوران التزامني. أما في أقمار الفئة الثانية، فلا يحدث سوى قدر ضئيل من التفاعل، ويظل القمر يدور بالطريقة نفسها تقريبًا التي يدور بها منذ تكوُّنه. غير أنَّ «هايبريون» و«إيابيتوس» من الاستثناءات؛ فوفقًا لهذه النظرية، ينبغي أن يفقد القمران القدر الأكبر من دورانهما الأولي ويزامنانه مع دورانهما المداري، لكنَّ ذلك لا يستمر لفترة طويلة؛ مليار عام تقريبًا فحسب.

بالرغم من ذلك، يدور «إيابيتوس» دورانًا تزامنيًّا بالفعل. هايبريون وحده هو الذي بدا أنه يفعل شيئًا مثيرًا للاهتمام. وكان السؤال هو: ماذا؟

قام ويزدام وزملاؤه بمقارنة البيانات الموجودة بشأن «هايبريون» بمعيار نظري للفوضى، وهو حالة تداخل الرنين. تنبَّأ هذا المعيار بأنَّ مدار «هايبريون» ينبغي أن يتفاعل على نحوٍ فوضوي مع دورانه المحوري، وهو تنبُّؤ قد تأكَّد بحل معادلات الحركة عدديًّا. تظهر الفوضى في ديناميكيات «هايبريون» في صورة تقلُّب عشوائي بصفة أساسية. لا يختلف شكل المدار نفسه اختلافًا كبيرًا. فهو يشبه كرة قدم أمريكية تتدحرج على مضمار ألعاب القوى وتتحرك في حارة واحدة، لكنها تنقلب رأسًا على عقب على نحوٍ لا يمكن التنبؤ به.

في عام ١٩٨٤، كان القمر الوحيد المعروف لبلوتو، هو «شارون» الذي اكتُشِف عام ١٩٧٨، ولم يتمكن أحد من حساب معدل دورانه. اكتُشِفت الأقمار الأربعة الأخرى بين

عامي ٢٠٠٥ و٢٠١٢. تتكدَّس الأقمار الخمسة كلها في منطقة صغيرة للغاية، ويُعتقَد أنها كانت في الأصل أجزاءً من جسم واحد كبير كان قد تصادم مع بلوتو خلال التكوُّن المبكِّر للنظام الشمسي، وتلك نسخة مصغرة من نظرية الاصطدام العملاق المتعلقة بتكوين قمرنا. إنَّ «شارون» قمر كبير ودائري، وهو في حالة تقييد مدي في رنين بنسبة ١:١؛ لذا يقابل بلوتو بالوجه نفسه على الدوام، مثلما يفعل القمر مع الأرض. بالرغم من ذلك، فعلى العكس من الأرض، يقابل بلوتو قمره بالوجه نفسه دائمًا. يحُول التقييد المدِّي والشكل المستدير دون التقلُّب الفوضوي. أما الأقمار الأربعة الأخرى، فهي صغيرة وغير منتظمة، ويُعرَف عنها الآن أنها تتقلب على نحوٍ فوضوي مثل «هايبريون».

لا يتوقف علم الأعداد المتعلِّق ببلوتو عند ذلك الرنين الذي تبلغ نسبته ١:١. فالأقمار «ستيكس» و«نيكس» و«كيربيروس» و«هيدرا»، تقع في مدارات رنينية مع «شارون» تبلغ نسبتها ١:٣، و١:٤، و١:٥، و١:٦؛ أي إنَّ طول فتراتها يبلغ ٣، و٤، و٥ و٦ أضعاف طول فترة «شارون». غير أنَّ هذه الأرقام متوسطات فحسب. فالفترات المدارية الفعلية تتنوع تنوعًا كبيرًا من دورة إلى أخرى.

بالرغم من هذا، يبدو ذلك كله منظمًا للغاية من الناحية الفلكية. ولأنَّ النظام يمكن أن يؤدي إلى ظهور الفوضى، فمن الشائع أن يوجد كلاهما في النظام نفسه؛ فيكون منظَّمًا من بعض النواحي، وفوضويًّا في نواحٍ أخرى.

يترأس ويزدام ولاسكار مجموعتي البحث الأساسيتين اللتين تعملان على الفوضى وديناميكيات النظام الشمسي الطويلة الأمد. وفي عام ١٩٩٣، نشرت المجموعتان في غضون أسبوع، أوراقًا بحثية تصف سياقًا كونيًّا جديدًا للفوضى: الميل المحوري للكواكب.

لقد رأينا في الفصل الأول أنَّ الجسم الصلب يدور حول محورٍ ما؛ أي خط يمر بالجسم يكون ساكنًا بشكل آني. يمكن لمحور الدوران أن يتحرك على مدار الوقت، لكنه يظل كما هو تقريبًا على المدى القصير. لذا، فإنَّ الجسم يدور مثل القمة، بينما يكون المحور كالمغزل المركزي. ولأنَّ الكواكب كروية الشكل تقريبًا، فهي تدور بمعدل شديد الانتظام حول محورٍ يبدو أنه لا يتغير، حتى على مدار قرون. وعلى وجه التحديد، فإنَّ الزاوية التي تقع بين المحور والمدار الشمسي، والتي تُعرف تقنيًّا باسم زاوية الميل المحوري، تبقى ثابتة. تبلغ قيمة هذه الزاوية لكوكب الأرض ٢٣٫٤ درجة.

غير أنَّ المظاهر خادعة. فقرابة العام ١٦٠ قبل الميلاد، اكتشف هيبارخوس تأثيرًا يُعرف باسم تقدُّم الاعتدالين. وفي «المجسطي»، يذكر بطليموس أنَّ هيبارخوس قد رصد

في سماء الليل مواقع نجم السماك الأعزل (ألفا العذراء) وغيره من النجوم. قام اثنان من سابقيه بالأمر نفسه: أريستيلوس قرابة عام ٢٨٠ قبل الميلاد، وتيموخاريس قرابة عام ٣٠٠ قبل الميلاد. وبمقارنة البيانات، استنتج بطليموس أنَّ نجم السماك الأعزل قد انجرف بمقدار درجتين عند رصده في الاعتدال الخريفي؛ أي الوقت الذي يتساوى فيه طول الليل والنهار. وقد استنتج أنَّ الاعتدالين يتحركان على مدار دائرة البروج بمقدار درجة تقريبًا كل قرن، وسيعودان في نهاية المطاف إلى حيث بدآ بعد ٣٦٠٠٠ عام.

إننا نعرف الآن أنه كان محقًّا، ونعرف سبب ذلك. فالأجرام الدوارة تتقدم: يتغير اتجاه محور دورانها ببطء، وتمثل حافة المحور دائرة بطيئة. كثيرًا ما تفعل القمم الدوارة ذلك. وبالرجوع إلى لاجرانج، يفسِّر الرياضيون التقدم على أنه الديناميكيات المعتادة لجسم يتسم بنوع محدد من التناظر: محوران متساويان من القصور الذاتي. تتحرك الكواكب في مدارات تتخذ شكل القطع الناقص تقريبًا؛ ومن ثمَّ فهي تستوفي هذا الشرط. يتقدم محور الأرض بفترة تبلغ ٢٥٧٧٢ من الأعوام. ويؤثر هذا في الكيفية التي نرى بها سماء الليل. الآن يصطف نجم القطب الشمالي «بولاريس»، الذي يقع في كوكبة الدب الأكبر، مع المحور ولهذا يبدو ثابتًا، بينما يبدو أنَّ بقية النجوم تدور حوله. وحقيقة الأمر أنَّ الأرض هي التي تدور. بالرغم من ذلك، ففي مصر القديمة قبل ٥٠٠٠ عام، كان النجم «بولاريس» يتحرك في دوائر، وكان النجم الخافت بطن الثعبان (فاي دراكونيس) هو الثابت. لقد اخترت ذلك التاريخ لأنَّ وجود نجم ساطع بالقرب من القطب أو عدم وجوده، هو أمر يتعلق بالحظ ليس إلا، وهو لا يوجد في معظم الأحيان.

حين يتقدم محور كوكبٍ ما، لا تتغير زاوية ميله. تنحرف الفصول الأربعة، لكنها تنحرف ببطء شديد حتى إنَّ هيبارخوس وحده هو مَن لاحظ، وفقط بمساعدة الأجيال السابقة أيضًا. إنَّ موقعًا محددًا على الكوكب يمر بالتغيرات الفصلية نفسها تقريبًا، لكنَّ توقيت هذه التغيرات يختلف ببطء كبير. وقد اكتشفت مجموعتا كلٍّ من لاسكار وويزدام أنَّ المريخ يختلف عن ذلك. ذلك أنَّ زاوية ميله المحوري تتغير هي أيضًا، مدفوعةً إلى حدٍّ ما بالتغيرات في مداره. فإذا كان لتقدم محوره رنين مع فترة أي عنصر مداري متغير، فيمكن لزاوية ميله المحوري أن تتغير. وقد حسبت المجموعتان ما يخلِّفه ذلك من تأثير عن طريق تحليل ديناميكيات الكوكب.

توضح حسابات ويزدام أنَّ زاوية الميل المحوري للمريخ تختلف على نحوٍ فوضوي، بمقدار يتراوح بين ١١ و٤٩ درجة. يمكن أن تتغير بمقدار ٢٠ درجة في ١٠٠٠٠٠ عام،

وهي تتذبذب على نحو فوضوي فوق ذلك النطاق، بمقدار ذلك المعدل تقريبًا. وقبل تسعة ملايين عام، كانت زاوية الميل المحوري تتراوح بين ٣٠ درجة و٤٧ درجة، واستمر ذلك حتى قبل ٤ ملايين عام حين تحولت على نحو مفاجئ نسبيًّا إلى نطاق يتراوح بين ١٥ درجة و٣٥ درجة. تتضمن الحسابات تأثيرات من النسبية العامة، وهي مهمة للغاية في هذه المسألة المحددة. فبدون تلك التأثيرات، لا يؤدي النموذج إلى هذا الانتقال. وسبب هذا الانتقال، كما خمنت، هو وجود رنين بين الدوران الذاتي والدوران المداري.

استخدمت مجموعة لاسكار نموذجًا مختلفًا، دون أي تأثيرات نسبوية، لكنه كان يضم تمثيلًا أكثر دقة للديناميكيات، كما أنه قد فحص فترة زمنية أطول. كانت النتائج التي حصلت عليها المجموعة مشابهة فيما يتعلق بالمريخ، لكنها وجدت أنَّ زاوية الميل المحوري تتراوح بين ٠ درجة و٦٠ درجة على مدار فترات زمنية أطول، وهو نطاق أكبر.

درست المجموعتان أيضًا عطارد والزهرة والأرض. يدور عطارد الآن حول نفسه ببطء شديد؛ إذ يكمل دورة واحدة كل ٥٨ يومًا، بينما يدور حول الشمس في ٨٨ يومًا في رنين تبلغ نسبته ٢:٣ بين الدوران الذاتي والدوران المداري. وقد حدث ذلك على الأرجح بسبب التفاعلات المدية مع الشمس، والتي أدت إلى إبطاء سرعة دورانه الذاتي الأصلية. أشارت الحسابات التي أجرتها مجموعة لاسكار إلى أنَّ عطارد كان يكمل في البداية مرة من الدوران الذاتي كل ١٩ ساعة. وقبل أن يصل الكوكب إلى حالته الحالية، تراوحت زاوية ميله المحوري بين ٠ درجة و١٠٠ درجة، واستغرق الأمر ما يقرب من ١٠٠ مليون عام كي تغطي معظم ذلك النطاق. وعلى وجه التحديد، مرت أوقات كان قطبه يواجه الشمس فيها.

يطرح الزهرة لغزًا أمام علماء الفلك؛ لأنه وفقًا للأعراف المعتادة بشأن زوايا الأجسام الدوارة، تبلغ زاوية ميله المحوري ١٧٧ درجة، بصورةٍ مقلوبة بصفة أساسية. يتسبَّب هذا في دورانه حول نفسه ببطءٍ شديد (مرة كل ٢٤٣ يومًا)، وفي الاتجاه المعاكس لجميع الكواكب الأخرى. ما من سببٍ معروف لهذه الحركة «التراجعية»، لكنَّ العلماء كانوا يعتقدون في ثمانينيَّات القرن العشرين أنها حركة أصلية؛ أي أنَّ أصلها يعود إلى نشأة النظام الشمسي. غير أنَّ تحليل لاسكار يُشير إلى أنَّ ذلك قد لا يكون صحيحًا. فالعلماء يعتقدون أنَّ فترة الدوران الذاتي للزهرة لم تكن تزيد في الأصل عن ١٣ ساعة. ووفقًا لهذا الافتراض، يوضح النموذج أنَّ زاوية الميل المحوري للزهرة كانت تتغير في البداية على نحو فوضوي وحين بلغت ٩٠ درجة، صار من الممكن أن تصبح أكثر استقرارًا لا فوضوية. وربما تكون قد تطورت تدريجيًّا من تلك الحالة إلى أن بلغت قيمتها الحالية.

أتت النتائج المتعلقة بالأرض مختلفة على نحوٍ مثير للاهتمام. فزاوية الميل المحوري للأرض مستقرة للغاية ولا تختلف إلا بمقدار درجة واحدة. يبدو أنَّ السبب في هذا هو قمرنا الكبير للغاية. فبدونه كانت زاوية الميل المحوري للأرض ستتراوح بين ٠ درجة و٨٥ درجة. على هذه الأرض البديلة، كانت الظروف المناخية ستصبح مختلفة للغاية. فبدلًا من دفء خط الاستواء وبرودة القطبين، كانت المناطق المختلفة ستختبر نطاقات من الحرارة مختلفة تمام الاختلاف. وكان هذا سيؤثر في أنماط الطقس.

لقد اقترح بعض علماء الطقس أنَّه لولا وجود القمر، لكانت التغيرات الفوضوية في الطقس ستزيد من صعوبة تطور الحياة، لا سيما الحياة المعقدة. بالرغم من ذلك، فقد تطورت الحياة في المحيطات. وهي لم تغزُ اليابسة إلا قبل ٥٠٠ مليون عام. لم تكن الحياة البحرية لتتأثر كثيرًا بتغير المناخ. أما في حالة حيوانات اليابسة، فإنَّ التغيرات المناخية التي كانت ستنتج عن غياب القمر سريعة بالمقاييس الزمنية الفلكية، لكنَّ حيوانات اليابسة كانت ستهاجر مع تغير المناخ؛ لأنَّ التغيرات بطيئة وفقًا لمقياسها الزمني. كان التطور سيستمر دونما عائق كبير. ربما حتى ازداد سرعةً بفعل وجود ضغط أقوى للتكيف.

إنَّ الآثار الفلكية التي وقعت بالفعل على الكائنات الأرضية الحية، أكثرُ إثارة للاهتمام من تلك الآثار الافتراضية التي لم تقع. أشهر هذه الآثار هو الكويكب الذي قضى على الديناصورات. أم إنه كان مذنَّبًا؟ وهل اشتركت في ذلك عوامل أخرى مؤثرة مثل ثورات بركانية ضخمة؟

ظهرت الديناصورات للمرة الأولى قبل ٢٣١ مليون عام في العصر الثلاثي «الترياسي»، واختفت قبل ٦٥ مليون عام في نهاية العصر الطباشيري «الكريتاسي». وفيما بين ظهورها واختفائها، كانت هي أنجح الفقاريات على الإطلاق في البحر وعلى اليابسة. مقارنةً بها، يوجد الجنس البشري «الحديث» منذ مليوني عام تقريبًا. غير أنه كانت توجد أنواع عديدة من الديناصورات؛ لذا فإنَّ هذه المقارنة ليست عادلة بعض الشيء. فمعظم الأنواع الفردية لا تصمد على قيد الحياة إلا لبضعة ملايين الأعوام.

يوضح السجل الأحفوري أنَّ الديناصورات انقرضت على نحو مفاجئ للغاية، وفقًا للمعايير الجيولوجية. وجاء هلاكها مصاحبًا لهلاك الموزاصوريات، والبلصورات، والأمونيتات، والعديد من الطيور، ومعظم الجرابيات، ونصف أنواع العوالق، والكثير

من الأسماك، وقنافذ البحر، والإسفنجيات، والحلزونات. إنَّ انقراض «العصر الطباشيري-الثلاثي» هذا، هو واحد من خمسة أحداث كبرى أو ستة، شهدت فَناء أعداد ضخمة من الأنواع في طرفة عين جيولوجية.[12] بالرغم من ذلك، فقد تمكَّنت الديناصورات من تركِ سلالات حديثة؛ فقد تطورت الطيور من ديناصورات وحشيات الأرجل في العصر الجوراسي. في نهاية عهدها، عاشت الديناصورات مع الثدييات التي كان بعضها كبيرًا إلى حدٍّ ما، ويبدو أنَّ اختفاء الديناصورات قد حفَّز زيادةً هائلة في تطور الثدييات؛ إذ اختفى المنافس الأساسي من المشهد.

ثمَّة اتفاق واسع في الرأي بين علماء الحفريات على أنَّ السبب الأساسي في انقراض العصر الطباشيري-الثلاثي، هو اصطدام كويكب أو ربما مذنَّب، قد خلَّف علامةً لا تُمحى على ساحل يوكاتان في المكسيك: فُوَّهة تشيكشولوب. أما فيما يتعلق بكون هذا هو السبب الوحيد أم لا، فلا يزال ذلك محل نزاع، ويعود ذلك جزئيًّا إلى وجود مرشح آخر منطقي يتمثَّل في سيول الحمم البركانية الضخمة التي شكلت مصاطب ديكان في الهند، والتي بعثت بكميات كبيرة من الغازات الضارة في الغلاف الجوي. لقد وُصِفت تكونات ديكان بأنها مصاطب لأنها تشبه الدَّرج؛ فطبقات البازلت غالبًا ما تخضع للتجوية في صورة سلسلة من خطوات الدَّرج. ربما كان تغير المناخ أو تغير طبقات البحر من العوامل المسئولة أيضًا. بالرغم من ذلك، فلا يزال الاصطدام هو المشتبه به الأساسي، وقد فشلت العديد من المحاولات في إثبات غير ذلك مع ظهور أدلة محسنة.

تتمثَّل المشكلة الأساسية في نظرية مصاطب ديكان في أنها قد تكوَّنت على مدار ٨٠٠٠٠٠ عام. وقد كان انقراض العصر الطباشيري-الثلاثي أسرع كثيرًا. ففي عام ٢٠١٣، استخدم تأريخ أرجون-أرجون (وهو نهج يعتمد على مقارنة نسب النظائر المختلفة لغاز الأرجون) لتحديد تاريخ الاصطدام إلى قبل ٦٦٠٤٣ مليون عام، تزيد أو تنقص بمقدار ١١٠٠٠ عام. ويبدو أنَّ فناء الديناصورات قد وقع في غضون ٣٣٠٠٠ عام من ذلك التاريخ. وإذا كان هذا صحيحًا، فإنَّ التوقيت يبدو قريبًا للغاية بدرجة يصعب معها أن يكون الأمر مصادفة. بالرغم من ذلك، فمن الممكن جدًّا أن تكون ثمَّة أسباب أخرى قد شكَّلت ضغوطات على الأنظمة البيئية في العالم، وكان الاصطدام هو رصاصة الرحمة فحسب. وبالفعل وجد فريق من علماء الجيوفيزياء بقيادة مارك ريتشاردز في عام ٢٠١٥، دليلًا واضحًا على أنَّ سيل الحمم البركانية من مصاطب ديكان قد تضاعف بعد الاصطدام بفترة قصيرة.[13] يزيد هذا الدليل من ترجيح نظرية قديمة مفادها أنَّ

الاصطدام قد أرسل موجات صدمية في جميع أنحاء الأرض. وقد ركزوا على المنطقة المقابلة تمامًا لفُوَّهة تشيكشولوب، والتي توجد قريبًا جدًّا من مصاطب ديكان.

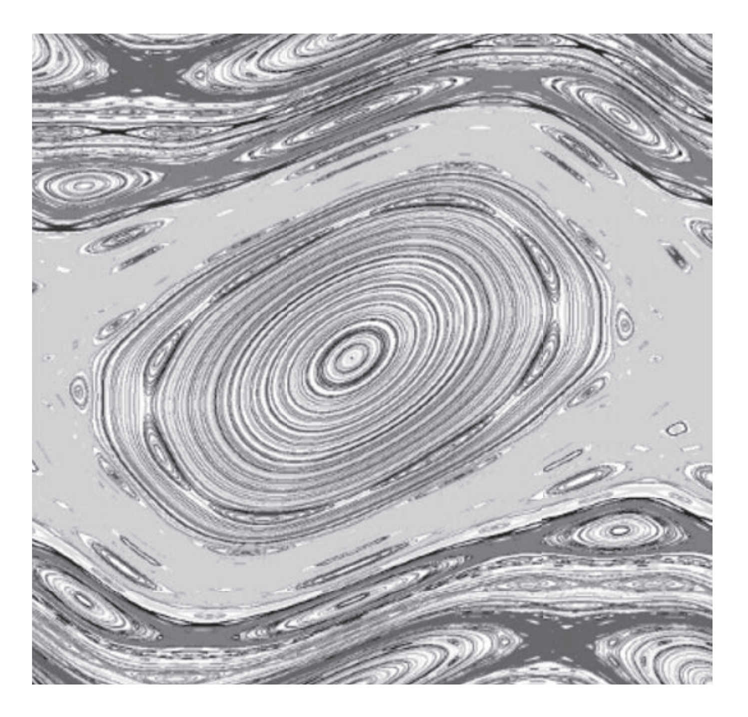
لقد حاول علماء الفلك أن يعرفوا ما إذا كان المصادم كويكبًا أم مذنَّبًا، وحاولوا أيضًا معرفة المكان الذي أتى منه. وفي عام ٢٠٠٧، نشر ويليام بوتك وآخرون[14] تحليلًا لتشابهات كيميائية تشير إلى أنَّ المصادم قد نشأ في مجموعة من الكويكبات تُعرف باسم عائلة «بابتينيستا»، وأنها انفصلت قبل ١٦٠ مليون عام تقريبًا. غير أنَّ كويكبًا واحدًا على الأقل من هذه المجموعة يمتلك تركيبًا كيميائيًّا خاطئًا، وفي عام ٢٠١١، قُدِّرَ توقيت الانفصال بـ ٨٠ مليون عام، مما لا يترك فترة طويلة بالدرجة الكافية قبل الاصطدام.

من الأمور التي ثبتت هي الكيفية التي تتسبب بها الفوضى في قذف الكويكبات إلى خارج حزامها إلى أن ينتهي بها الأمر بالاصطدام بالأرض. إنَّ المتهم في ذلك هو المشتري، ويساعده المريخ بجدارة.

لعلك تتذكر من الفصل الخامس أنَّ حزام الكويكبات به فجوات على تلك المسافات من الشمس التي تشح فيها الأجرام للغاية، وأنَّ هذه الفجوات تتوافق مع مدارات ترتبط برنين مع المشتري. في عام ١٩٨٣، درس ويزدام تكوُّن فجوة كيركوود التي يبلغ رنينها ٣ : ١؛ سعيًا منه لفهم الآلية الرياضية التي تتسبب في طرد الكويكبات من مثل ذلك المدار. كان الرياضيون والفيزيائيون قد اكتشفوا بالفعل ارتباطًا وثيقًا بين الرنين والفوضى. ففي صميم الرنين، يكمن مدار دوري يدور فيه الكويكب حول نفسه عددًا صحيحًا من المرات، بينما يدور المشتري عددًا صحيحًا آخر من المرات. هذان العددان هما ما يميزان الرنين، وهما في المثال السابق ٣ و١. بالرغم من ذلك، سيتغير هذا المدار لأنَّ الأجرام الأخرى تؤدي إلى اضطراب الكويكب. والسؤال هو: كيف؟

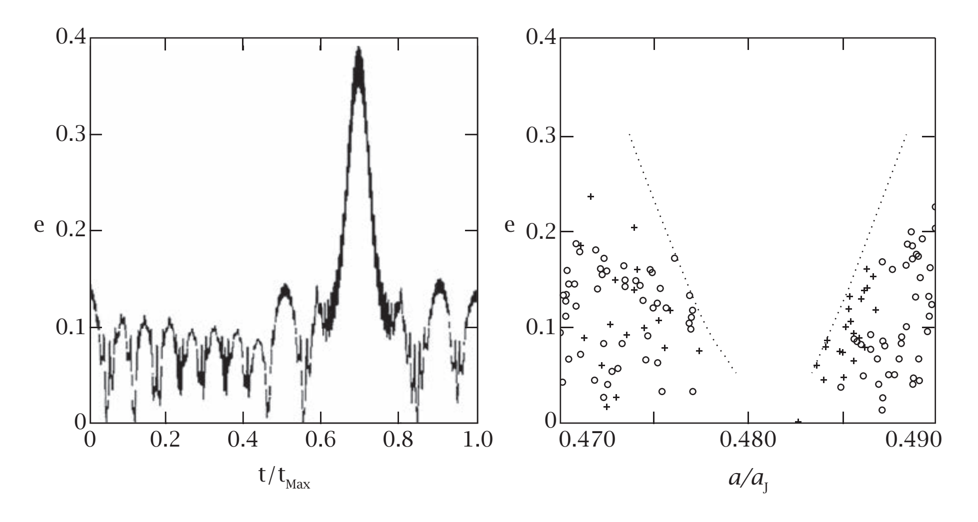
في منتصف القرن العشرين، توصَّل ثلاثة من الرياضيين هم أندريه كولموجروف وفالديمير أرنولد ويورجين موزر، إلى ثلاثة أجزاء مختلفة من إجابة هذا السؤال تجتمع معًا في مبرهنة «كولموجروف–أرنولد–موزر» التي تُعرف اختصارًا باسم «كام». تنص هذه المبرهنة على أنَّ المدارات التي توجد بالقرب من مدار دوري تنقسم إلى نوعين. بعضها يكون مدارات شبه دورية تتحرك حول المدار الأصلي بطريقة منتظمة. أما النوع الآخر منها فيكون فوضويًّا. وعلاوةً على ذلك، يتداخل النوعان على نحوٍ معقد. ذلك أنَّ المدارات شبه الدورية تتحرك في مسارات لولبية تحيط بالمدار الدوري. يوجد عدد كبير للغاية من

هذه الأنابيب. ويوجد فيما بينها أنابيب أكثر تعقيدًا تدور في مسارات لولبية حول مدارات لولبية. ويوجد بين هذه الأنابيب الأكثر تعقيدًا، أنابيب أخرى تتسم بدرجة أكبر وأكبر من التعقيد، وهي تدور حول «تلك» الأنابيب في مسارات لولبية، وهكذا دواليك. (وهذا هو المقصود بالمدارات شبه الدورية.) تملأ المدارات الفوضوية تلك الفجوات المتشابكة التي تقع بين جميع هذه اللوالب، واللوالب المتعددة، وهي تُعرَّف بتشابكات بوانكاريه التماثلية.



مقطع عرضي محسوب عدديًّا لمدار يقع بالقرب من مدار دوري، وفقًا لمبرهنة «كولموجروف-أرنولد-موزر».

يمكن تخيُّل هذا البناء الشديد التعقيد من خلال استعارة إحدى خدع بوانكاريه والنظر إليها في مقطع عرضي. يتناظر المدار الدوري الابتدائي مع النقطة المركزية، وتتمثَّل أنابيب المدارات شبه الدورية في المنحنيات المغلقة في صورة مقاطع عرضية، أما المناطق



على اليسار: ارتفاع الانحراف المركزي (المحور الرأسي). المحور الأفقي يمثل الزمن. على اليمين: الحواف الخارجية للمنطقة الفوضوية (خطوط متصلة) والعناصر المدارية للكويكبات (نقاط وصلبان). المحور الرأسي يمثل الانحراف المركزي، بينما يمثل المحور الأفقي نصف القطر الأكبر بالنسبة إلى نصف القطر الأكبر للمشتري.

المظللة فيما بينها فهي آثار المدارات الفوضوية. يمر مثل ذلك المدار بنقطةٍ ما في المنطقة المظللة، ويقطع دورة كاملة بالقرب من المدار الدوري الأصلي، ويقطع المقطع العرضي مجددًا في نقطة ثانية، تبدو العلاقة بينها وبين النقطة الأولى عشوائية. لن يكون ما ستراه كويكبًا يتحرك كالسكران؛ بل كويكب تتغير عناصره المدارية على نحو فوضوي من مدار إلى التالي.

لإجراء حسابات محددة لفجوة كيركوود التي تبلغ نسبتها ١:٣، اخترع ويزدام طريقة جديدة لنمذجة الديناميكيات: صيغة تتماشى مع طريقة اصطدام المدارات المتتابعة بالمقطع العرضي. وبدلًا من حل معادلة تفاضلية للمدار، تستمر في تطبيق الصيغة فحسب. تؤكد النتيجة وجود المدارات الفوضوية، وتقدم تفاصيل عن شكلها. تتسم المدارات الأكثر إثارة للاهتمام من بينها بأنَّ الانحراف المركزي للأشكال الإهليلجية التقريبية يصبح أكبر فجأة. وبهذه النتيجة، فإنَّ المدار الذي يتخذ شكلًا إهليلجيًّا شبيهًا بالدائرة؛ أي شكلًا إهليلجيًّا عريضًا، يتحوَّل إلى شكل إهليلجي طويل وضيق. الواقع أنه يصبح طويلًا بما يكفي لأن يقطع مدار المريخ. ولأنه يستمر في فعل هذا، فثمَّة احتمال كبير بأن يقترب

من المريخ؛ ومن ثمَّ يؤدي تأثير المقلاع إلى اضطرابه. وسيؤدي هذا إلى قذفه في أي مكان. وقد اقترح ويزدام أنَّ هذه الآلية هي الكيفية التي يخلي بها المشتري فجوة كيركوود التي تبلغ نسبتها ٣ : ١. وللتأكد من ذلك، رسم العناصر المدارية للكويكبات القريبة من الفجوة وقارنها بالمنطقة الفوضوية في نموذجه. وقد كان التشابه تامًّا إلى حدٍّ كبير.

ما يحدث بصفة أساسية هو أنَّ كويكبًا يحاول أن يدور في الفجوة، يتقلقل بفعل الفوضى، ويُدفع إلى المريخ، الذي يركله بعيدًا. يقوم المشتري بركلة ركنية، ويسدِّد المريخ الهدف. وفي بعض الأحيان، في بعض الأحيان فقط، يركل المريخ في اتجاهنا. وإذا حدث وأصابت الركلة هدفها، فإنَّ المريخ يحرز هدفًا، بينما لا تحرز الديناصورات أي شيء.

الفصل العاشر

طريق ما بين الكواكب السريع

«إنَّ السفر في الفضاء محض هراء.»

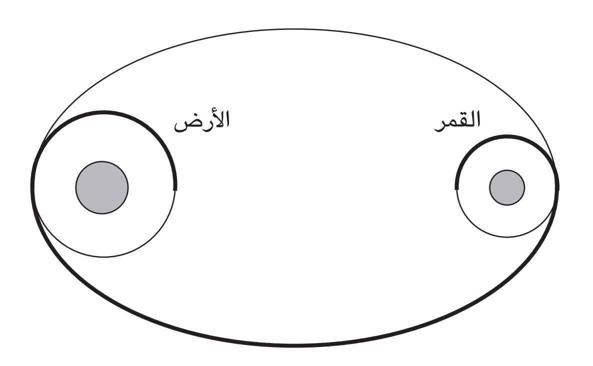
ريتشارد وُلي، فلكي ملكي، ١٩٥٦

حين بدأ العلماء الاستشرافيون والمهندسون في التفكير بجدية بشأن الهبوط بالبشر على القمر، كانت إحدى مشكلاتهم الأولى هي تحديد الطريق الأنسب. لكلمة «الأنسب» معانٍ عديدة. غير أنَّ المتطلبات اللازمة في هذا السياق تتمثَّل فيما يلي: مسار سريع، والحد من الوقت الذي يقضيه رواد الفضاء المعرَّضون للضرر مندفعين عبر الفراغ في علبة صفيحية فخمة، وتقليل عدد مرات تشغيل محرك الصاروخ وقفله قدر الإمكان لتقليل احتمالية تعطله.

حين هبطت «أبولُّو ١١» برائدي فضاء على القمر، كان مسارها يتبع هذين المبدأين. ففي البداية وُضِعت المركبة الفضائية في مدار الأرض المنخفض، حيث يمكن التحقق من كل شيء للتأكد أنه لا يزال يتمتع بوظائفه. وبعد ذلك، أدت دفقة واحدة من المحركات إلى الإسراع بالمركبة باتجاه القمر. وحين اقتربت، أدت بضع دفقات إضافية إلى الإبطاء بها مجددًا ووضعتها في مدار القمر. نزلت وحدة الهبوط على السطح، وعاد نصفها العلوي مع الطاقم بعد بضعة أيام. طُرِحت المركبة بعد ذلك، وعاد الطاقم إلى الأرض بدفقة أخرى من المحرك لإخراجهم من مدار القمر. عند الاقتراب من الوطن، وصلوا إلى أكثر الأجزاء خطورةً في المهمة بأكملها، وهو استخدام الاحتكاك مع الغلاف الجوي للأرض بمثابة المكابح، لإبطاء كبسولة القيادة بما يكفي للهبوط باستخدام المظلات.

ظل هذا النوع من المسارات، الذي يُعرَف في أبسط صوره باسم مدار هوهمان الإهليلجي، يُستخدم في معظم البعثات الفضائية. ذلك أنَّ هذا المسار مثالي من ناحيةٍ ما.

فهو أسرع من معظم البدائل رغم استخدامه كمية الوقود الصاروخي نفسها. غير أنه مع اكتساب البشر للخبرة في بعثات الفضاء، أدرك المهندسون أنَّ أنواعًا أخرى من البعثات تتطلب شروطًا مختلفة. أحد هذه الشروط على وجه التحديد أنَّ السرعة أقل أهمية في حالة إرسال آلة أو إمدادات.



مدار هوهمان الإهليلجي. يوضح الخط السميك مدار هوهمان.

حتى العام ١٩٦١، كان مخططو البعثات مقتنعين أنَّ مدار هوهمان مثالي؛ لذا فقد كانوا يرون أنَّ مجال جاذبية الكوكب عائق يجب التغلب عليه باستخدام دفع إضافي. غير أنَّ مايكل مينوفيتش قد اكتشف بعد ذلك تأثير المقلاع في محاكاة له.[1] وفي غضون عقود قليلة، أدَّت أفكار جديدة من رياضيات المدارات متعددة الأجسام إلى اكتشاف أنَّ المركبات الفضائية يمكن أن تصل إلى وجهتها بمقدارٍ أقل كثيرًا من الوقود من خلال اتباع مسار مختلف للغاية عن ذلك المستخدَم للهبوط على القمر. ومقابل ذلك أنه يستغرق وقتًا أطول كثيرًا، وقد يستلزم سلسلةً أكثرَ تعقيدًا من تعزيزات الصواريخ. بالرغم من ذلك، فالمحركات الصاروخية في الوقت الحالي أكثر جدارة بالثقة، ويمكن إطلاقها مرارًا دون زيادة كبيرة في احتمالية الفشل.

بدلًا من التفكير في الأرض والهدف النهائي فحسب، بدأ المهندسون في التفكير بشأن جميع الأجرام التي قد تؤثِّر في مسار مسبار الفضاء. إنَّ مجالات جاذبيتها تجتمع لتشكل منظرًا من الطاقة، وتلك استعارة تناولناها فيما يتعلق بنقاط لاجرانج وكويكبات «جريك» و«تروجان». تتجول المركبة الفضائية المعنية حول الخطوط المحيطية لهذا المنظر. يتمثَّل

أحد الاختلافات في أنَّ المنظر يتغير مع حركة الجسم. ويتمثل آخر في أنَّ هذا المنظر يقع في أبعاد عدة من الناحية الرياضية، لا في الأبعاد الثلاثة المعتادة فحسب؛ لأنَّ السرعة المتجهة مهمة وكذلك الموقع. أما الاختلاف الثالث فهو أنَّ الفوضى تلعب دورًا أساسيًّا؛ إذ يمكن استخدام تأثير الفراشة للحصول على نتائج كبيرة من أسباب صغيرة.



تصوُّر أحد الفنانين لطريقٍ ما بين الكواكب السريع. تمثِّل الأنشوطة مسارًا واحدًا محتملًا بطول أحد الأنابيب، وتمثل مناطق الانقباض نقاط لاجرانج.

لقد استُخدِمت هذه الأفكار في بعثات حقيقية. وهي تشير أيضًا إلى أنَّ النظام الشمسي يضم شبكةً غير مرئية من الأنابيب التي تربط بين كواكبه؛ أي نظامًا من الطرق السريعة بين الكواكب يوفِّر مسارات في غاية الكفاءة تربط فيما بينها.[2] وربما تفسِّر هذه الديناميكيات التي تحكم هذه الأنابيب كيفية تباعد الكواكب، فتكون بمثابة تقدم حديث على قانون تيتيوس-بوديه.

تُعد بعثة «روزيتا» مثالًا على الطرق الجديدة لتصميم المسارات للمسابير الفضائية. وهي لا تستخدم تأثير الفراشة، لكنها توضح كيف أنَّ التخطيط التخيلي يمكن أن يؤدي إلى نتائج تبدو مستحيلة في البداية، وذلك من خلال الاستفادة من السمات الطبيعية لمنظر

الجاذبية في النظام الشمسي. كانت بعثة «روزيتا» صعبة من الناحية التقنية، ويعود ذلك بدرجة كبيرة إلى المسافة وسرعة الهدف. ففي وقت الهبوط، كان المذنَّب «٦٧ بي» يبعد ٤٨٠ مليون كيلومتر عن الأرض، ويتحرك بسرعة تزيد عن ٥٠٠٠٠ كيلومتر في الساعة. وتلك سرعة تبلغ ستين ضعف ما تبلغه سرعة طائرة ركاب نفاثة. بسبب القيود الحالية في علم الصواريخ، فإنَّ طريقة «التوجيه والانطلاق» التي استُخدِمَت للهبوط على سطح القمر لن تنجح.

إنَّ الخروج من مدار الأرض بالسرعة الكافية صعب ومكلِّف، لكنه ممكن. وقد اتخذت بعثة «نيو هورايزونز» المتجهة إلى بلوتو، الطريق المباشر بالفعل. صحيح أنها اقترضت من المشتري بعض السرعة المتجهة الإضافية في الطريق، لكنها كانت ستصل إلى وجهتها دون ذلك باستغراق فترة زمنية أطول. كانت المشكلة الكبيرة هي الإبطاء من جديد، وقد أمكن حل هذه المشكلة دون محاولة حتى. لقد استخدمت «نيو هورايزونز»، أسرعُ مركبة فضائية أُطلِقت، صاروخًا قويًّا للغاية به خمسة من معزِّزات الوقود الصلب، ومرحلة إضافية نهائية للوصول إلى السرعة المطلوبة عند مغادرة الأرض. وقد خلَّفت البقية أيضًا بأسرع ما يمكن؛ فقد كانت ثقيلة لا يمكن حملها، وفارغة من الوقود على أي حال. حين وصل المسبار إلى بلوتو، انطلقت عبر النظام بسرعة كبيرة، وكان عليه أن يقوم بجميع مهامه الرصدية العلمية الأساسية في غضون يوم واحد تقريبًا. وفي أثناء ذلك الوقت، كان مشغولًا للغاية بما لا يسمح بالتواصل مع الأرض؛ فسادت فترة من التوتر بينما كان علماء البعثة والمشرفون عليها في انتظار معرفةِ ما إذا كان المسبار نجا من اللقاء أم لا؛ إذ كان يمكن أن يثبت أنَّ الاصطدام بذرة غبار واحدة فتاكًا.

على عكس ذلك، كان على «روزيتا» أن يلتقي بالمذنَّب «٦٧ بي» وأن «يظل معه» بينما يقترب المذنَّب من الشمس، مع رصده طوال الوقت. كان عليه أن يضع «فايلي» على سطح المذنَّب. وبالنسبة إلى المذنَّب، كان على «روزيتا» أن يبقى ثابتًا تقريبًا، لكنَّ المذنَّب كان يبعد ٣٠٠ مليون عام وكان يتحرك بسرعة هائلة تبلغ ٥٥٠٠٠ كيلومتر في الساعة. ومن ثمَّ؛ فقد كان يلزم تصميم مسار البعثة بما يسمح بوصوله إلى السرعة المطلوبة، على أن ينتهي المسبار في المدار نفسه الذي يوجد فيه المذنَّب. لقد كان التوصل إلى مسار مناسب مهمة صعبة، وكذلك كان إيجاد مذنَّب مناسب.

وعلى أية حال، تبع المسبار طريقًا غيرَ مباشر على الإطلاق،[3] وعاد مع أشياء أخرى بالقرب من الأرض «ثلاث مرات». كان الأمر يشبه السفر من لندن إلى نيويورك من خلال

الانتقال إيابًا وذهابًا بين لندن وموسكو لعدة مرات في البداية. غير أنَّ المدن تظل في مكانها بالنسبة إلى الأرض، أما الكواكب فلا، وهذا هو ما يشكِّل الفرق بأكمله. بدأ المسبار رحلته الملحمية بالتحرك في اتجاهٍ يبدو ببساطة أنه الاتجاه الخاطئ تمامًا. لقد كان يتحرك «باتجاه» الشمس، رغم أنَّ المذنَّب كان يقع على مسافة بعيدة خارج مدار المريخ، وكان يتحرك مبتعدًا. (وأنا لا أعني أنه كان يتحرك «مباشرةً» باتجاه الشمس، لكنَّ المسافة إلى الشمس كانت تغدو أقصر.) مرَّ مدار «روزيتا» سريعًا بالشمس، ثم عاد بالقرب من الأرض حيث قُذِف إلى الخارج ليلتقي بالمريخ. مرَّ بعد ذلك ليلتقي بالأرض ثانية، ثم عاد إلى ما وراء المريخ «مجددًا». بحلول ذلك الوقت، كان المذنَّب على الجانب البعيد من الشمس وأقرب إليها مما كان عليه «روزيتا». ثمَّة لقاء ثالث مع الأرض ألقى المسبار إلى الخارج مجددًا في مطاردة للمذنَّب؛ إذ كان يسرع حينها مبتعدًا عن الشمس. وأخيرًا، صار المسبار «روزيتا» في لقائه مع القدر.

ما السبب في اختيار مثل ذلك المسار المعقَّد؟ إنَّ وكالة الفضاء الأوروبية لم توجِّه صاروخها إلى المذنَّب وتطلقه فحسب. فقد كان ذلك سيتطلب الكثير جدًّا من الوقود، وعند وصول الصاروخ، كان المذنَّب سيصبح في مكان آخر. عوضًا عن ذلك، أدَّى المسبار «روزيتا» رقصة كونية مصممة بعناية، بينما يقع تحت تأثير قوى جاذبية الشمس والأرض والمريخ وغير ذلك من الأجرام الوثيقة الصلة. صُمِّم مساره الذي جرى حسابه باستخدام قانون نيوتن للجاذبية، لمراعاة كفاءة الوقود. فكل مرة كان يمر المسبار فيها قريبًا من الأرض والمريخ، كانت تمنحه دفعة مجانية؛ إذ يقترض الطاقة من الكوكب. وحافظت الدفعات الصغيرة التي كانت تنطلق بين الحين والآخر من أربع دافعات، على بقاء المركبة في مسارها. جاء ثَمن حفظ الوقود متمثلًا في أنَّ «روزيتا» قد استغرق ١٠ سنوات كي يصل إلى وجهته. لكن من دون دفع ذلك الثمن، كان مجرد الإقلاع عن الأرض سيصبح مكلفًا للغاية.

إنَّ هذا النوع من أنواع المسارات الذي يلتف مرارًا دخولًا وخروجًا، للحصول على دفعاتِ سرعةٍ متزنة من الكواكب والأقمار، صار شائعًا في بعثات الفضاء حين لا يكون عامل الوقت جوهريًّا. فحين يمر مسبار فضائي ما خلف كوكب في أثناء حركته حول مداره، يستطيع أن يسرق بعضًا من طاقة الكوكب في مناورة من نوع المقلاع. «يبطئ» الكوكب في حقيقة الأمر، لكنَّ سرعته تقل بدرجة طفيفة للغاية حتى إنَّ أكثر الأجهزة حساسية لا تستطيع رصد ذلك. وبهذا، يحصل المسبار على دفعةٍ للسرعة دون استهلاك أي مقدار من الوقود الصاروخي.

دائمًا ما يكمن الشيطان في التفاصيل. ومن أجل تصميم مثل هذا المسار، لا بد أن يكون المهندسون قادرين على التنبؤ بحركات جميع الأجرام المعنية، وينبغي عليهم أن يجعلوا جميع عناصر الرحلة متلائمة معًا للوصول بالمسبار إلى وجهته. وعلى هذا النحو يكون تخطيط البعثة مزيجًا من الحسابات والسحر الأسود. ذلك أنَّ كل شيء فيها يتوقف على مجال من النشاط البشري نادرًا ما يُشار إلى دوره أصلًا في استكشاف الفضاء، غير أنه لا يمكن تحقيق أي شيء من دونه. فحين تبدأ وسائل الإعلام في الحديث عن «نماذج الكمبيوتر» أو «الخوارزميات»، بوسعك أن تفترض أنهم يقصدون «الرياضيات» في واقع الأمر، لكنهم خائفون للغاية من ذكر الكلمة، أو يعتقدون أنها ستخيفك «أنت». ثمَّة أسباب وجيهة لعدم إزعاج الأفراد بالتفاصيل الرياضية المعقَّدة، غير أنَّ التظاهر بعدم وجود واحدة من أقوى طرق التفكير التي توصَّلت إليها البشرية، ضررٌ كبير.

كانت الخدعة الديناميكية الأساسية للمسبار «روزيتا» هي مناورة المقلاع. فبخلاف تلك اللقاءات المتكررة، تبع المسبار مجموعة من مدارات هوهمان. وبدلًا من التحرك في مدار المذنَّب «٦٧ بي»، سار في مدار إهليلجي قريب حول الشمس. غير أنَّ هناك خدعة مختلفة أكثر إثارة للاهتمام تغيِّر قواعد اللعبة، وتُحدث ثورة في تصميم مسارات البعثات. ومن المدهش أنها تعتمد على الفوضى.

لقد شرحت في الفصل التاسع أنَّ الفوضى بالمعنى الرياضي ليست مصطلحًا فخمًا للسلوك العشوائي المضطرب. وإنما هي السلوك الذي «يبدو» عشوائيًّا ومضطربًا، لكنه يخضع لنظام خفي من القواعد الحتمية الصريحة. وفي حالة الأجرام السماوية تتمثَّل تلك القواعد في قوانين الحركة والجاذبية. للوهلة الأولى، لا تساعدنا القواعد بدرجة كبيرة لأنَّ دلالتها الأساسية أنَّه لا يمكن التنبؤ بالحركة الفوضوية على المدى الطويل. فثمَّة أفق للتنبؤ، وفيما بعده، سيطغى أي خطأ ضئيل حتمي في قياس الحالة الحالية على أي حركة جرى التنبؤ بها. لا يمكن التنبؤ بأي شيء خارج الأفق. ولهذا تبدو الفوضى أمرًا سيئًا برُمَّته.

تمثلت إحدى أوجه النقد الأولى التي وُجِّهَت إلى «نظرية الفوضى» في أنَّ الفوضى لا يمكن التنبؤ بها؛ ومن ثمَّ فهي تطرح صعوباتٍ أمام البشر في فَهْم الطبيعة. فما الجدوى من نظريةٍ تجعل كل شيءٍ أصعب؟ إنها ليسَت عديمة الجدوى فحسب؛ بل هي أسوأ من ذلك. بدا أنَّ المحاجين بهذا الأمر يتخيلون أنَّ الطبيعة سترتِّب نفسها بمعجزةٍ ما

لتتجنب الفوضى وتساعدنا. أو ربما أنَّنا إن لم «نلاحظ» أنَّ بعض الأنظمة لا يمكن التنبؤ بها، فسوف تكون قابلة للتنبؤ بدلًا من ذلك.

إنَّ العالم لا يسير بهذه الطريقة. فهو لا يشعر بأي اضطرار لإرضاء البشر. ووظيفة النظريات العلمية أن تساعدنا على فهم الطبيعة، أما تحسين التحكم في الطبيعة فهو ناتج شائع وليس الهدف الأساسي. فنحن نعرف على سبيل المثال أنَّ لب الأرض يتكوَّن من الحديد المنصهر؛ إذن لا يوجد أي احتمال حقيقي للوصول إليه، وإن كان ذلك بماكينة حفر ذاتية التحكم. يا لها من نظرية سخيفة! يا لها من نظرية عديمة الجدوى. غير أنها صحيحة مع الأسف. والحق أنها مفيدة أيضًا؛ فهي تساعد في تفسير المجال المغناطيسي للأرض، مما يساعدنا في البقاء على قيد الحياة من خلال تحويل الإشعاع.

ينطبق الأمر نفسه على نظرية الفوضى، التي يتمثَّل هدفها الأساسي في أنَّ الفوضى «موجودة» في العالم الطبيعي. وفي الظروف الملائمة المعتادة، لا تكون سوى نتيجة حتمية لقوانين الطبيعة، كتلك الأنماط اللطيفة البسيطة، ومنها المدارات الدورية الإهليلجية التي بدأت الثورة العلمية. ولأنها موجودة بالفعل، فلا بد لنا من أن نعتاد عليها. حتى وإن كان النفع الوحيد لنظرية الفوضى هو تنبيه البشر بأن يتوقعوا وجود السلوكيات العشوائية في الأنظمة المستندة إلى القواعد، فإنَّه سيكون أمرًا جديرًا بالمعرفة. ذلك أنه سيوقفنا عن البحث عن تأثيرات خارجية غير موجودة قد نظن لولا معرفتنا بنظرية الفوضى أنها السبب في عدم الانتظام.

الحق أنَّ لـ «نظرية الفوضى» المزيد من النتائج المفيدة. فالفوضى تنبثق من القواعد؛ ومن ثمَّ يمكن استخدام الفوضى في الاستدلال على القواعد، واختبارها، والتوصل إلى استنتاجات منها. ولما كانت الطبيعة تتصرَّف بفوضويَّةٍ في معظم الأحيان، فمن الأفضل أن نفهم الكيفية التي تعمل بها الفوضى. غير أنَّ الحقيقة لا تزال أكثر إيجابية. ويمكن للفوضى أن تكون مفيدةً لك بفعل تأثير الفراشة. ذلك أنَّ الاختلافات الأولية الصغيرة يمكن أن تتسبَّب في تغييراتٍ كبيرة. لنفكِّر في هذا الأمر على نحو عكسي. فلنفترض أنك تريد أن تتسبَّب في حدوث إعصار. تبدو مهمة ضخمة. بالرغم من ذلك، يوضح لنا تيري براتشيت في روايته «أوقات مشوقة» أنَّ كلَّ ما عليك فعله هو إيجاد الفراشة المناسبة وبعد ذلك، «ستخفق» هي بأجنحتها.

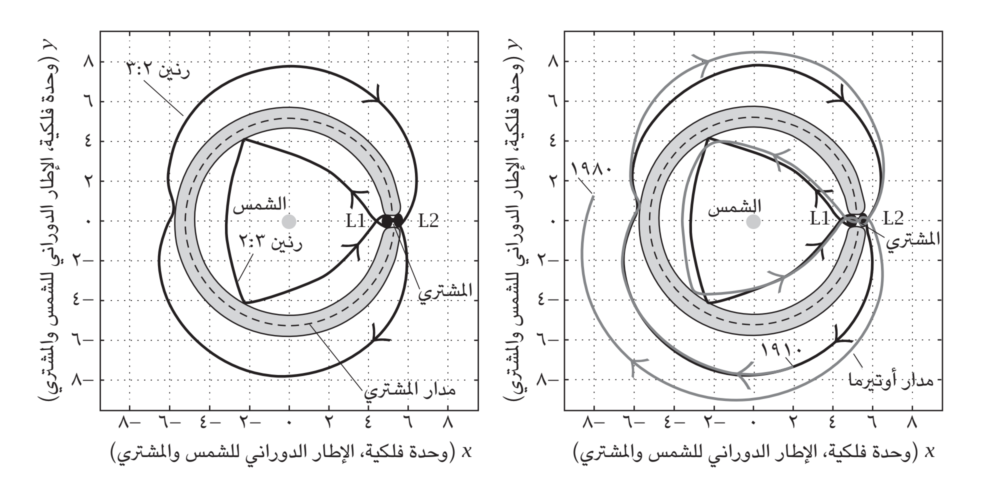
تلك هي الفوضى بصفتها صورةً فعالة من صور التحكم، لا عائقًا. إذا استطعنا أن نقوم بالهندسة العكسية لتأثير الفراشة، فسنتمكن من إعادة توجيه النظام الفوضوي إلى

حالة جديدة بمجهود ضئيل للغاية. يمكننا إسقاط حكومة وبدء حرب من خلال تحريك إصبع فحسب. أتظن أنَّ ذلك غير محتمل؟ لكن تذكَّر سراييفو. إذا كانت الظروف ملائمة، فكلُّ ما يتطلبه الأمر هو إصبع يضغط على زناد مسدس.[4]

إنَّ مسألة الأجسام المتعددة في علم الفلك فوضوية. وتسخير تأثير الفراشة في ذلك السياق يتيح لنا إعادة توجيه مسابير الفضاء دون استخدام أي مقدار يُذكر من الطاقة الدافعة. يمكننا على سبيل المثال، أن نركل مسبارًا قمريًّا باليًا خارج مدار موته حول القمر، ونرسله ليلقي النظر على مذنَّبٍ ما. يبدو ذلك غير مرجَّح أيضًا، لكنَّ تأثير الفراشة قادر على تحقيق ذلك مبدئيًّا.

فما العائق؟ (دائمًا ما يوجد عائقٌ ما. فثمَّة ثَمن لكل شيء.)

والإجابة هي إيجاد الفراشة الصحيحة.



على اليسار: منظر الجاذبية لمدار أوتيرما، ويظهر فيه مدار دوري يرتبط مع المشتري بعلاقة رنين تبلغ نسبته ٢:٣. على اليمين: المدار الفعلي للمذنَّب من عام ١٩١٠ إلى ١٩٨٠.

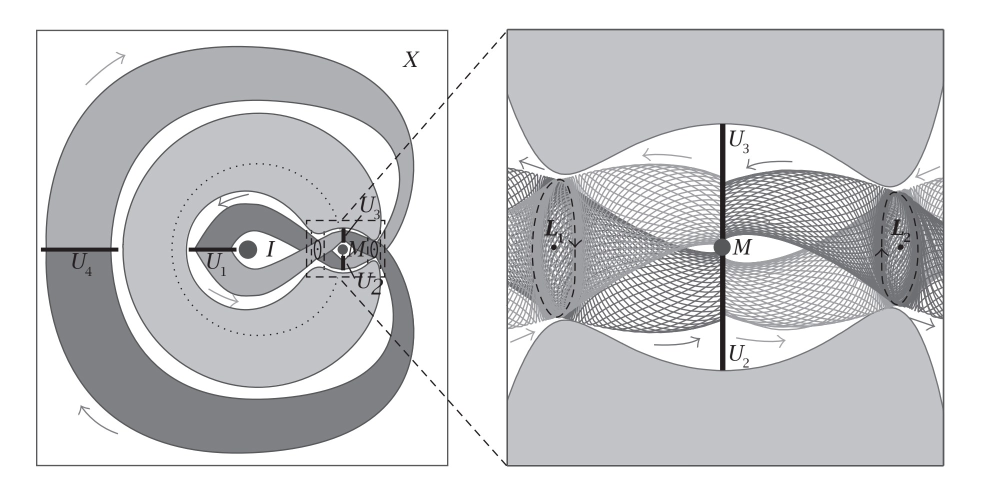
إنَّ مدارًا من نوع مدارات هوهمان الإهليلجية يربط مدار الأرض بمدار آخر حول العالَم المستهدف، ومع قدر من التعديل، يغدو خيارًا جيدًا للغاية للبعثات التي تضم بشرًا. فحين تنقل سلعًا قابلة للتلف (بشرًا)، فسوف تحتاج إلى الوصول إلى وجهتك سريعًا. أما حين لا يكون عامل الوقت جوهريًّا، فثمَّة طرق بديلة تستغرق وقتًا أطول، لكنها

تستهلك وقودًا أقل. وللاستفادة من تأثير الفراشة، نحتاج إلى مصدر للفوضى. يتألف مدار هوهمان من ثلاثة مدارات مختلفة (شكل إهليلجي ودائرتين) تتشابك معًا ويضم كلٌّ منها جرمين، وذلك باستخدام دفعات من أجهزة الدفع لتغيير مكان المسبار من مدار إلى آخر. غير أنَّ مسألة الجسمين لا تنطوي على أي قدر من الفوضى. أين نجد الفوضى المدارية؟ في معضلة الأجسام الثلاثة. لذا، فإنَّ ما ينبغي علينا التفكير بشأنه هو تجميع مدارات «ثلاثية الأجرام». يمكننا أن نضيف مدارات ثنائية الجِرم أيضًا إن كان هذا سيفيد، لكننا لن نكتفي بها.

في نهايات ستينيات القرن العشرين، أوضح تشارلز كونلي وريتشارد ماجيهي أنَّ كلًّا من مثل هذه المسارات يُحاط بمجموعة متداخلة من الأنابيب، كلٌّ منها بداخل الأخرى. يتناظر كل أنبوب مع خيار محدد للسرعة؛ فكلما ابتعدت السرعة عن المقدار الأمثل، زاد اتساع الأنبوب. ويظل إجمالي الطاقة على سطح أيٍّ من هذه الأنابيب ثابتًا. إنها فكرة بسيطة تنتج عنها نتيجة بارزة. فمن أجل زيارة عالَم آخر على نحو موفِّر للوقود، اتبع طريقة الأنبوب.

ترتبط الكواكب والأقمار والكويكبات والمذنَّبات معًا من خلال شبكة من الأنابيب. دائمًا ما كانت هذه الأنابيب موجودة، لكنها لا تُرى إلا من خلال العين الرياضية، وجدرانها هي مستويات الطاقة. إذا استطعنا تكوين تصوُّر لمنظر مجالات الجاذبية المتغير على الدوام، والذي يتحكم في الكيفية التي تتحرك بها الكواكب، فسوف نتمكن من رؤية الأنابيب تدور مع الكواكب في رقصة الجاذبية البطيئة الجليلة التي تؤديها. غير أننا نعرف الآن أنَّ الرقصة قد تكون غير قابلة للتنبؤ.

لنتناول المذنَّب أوتيرما مثالًا، وهو مذنَّب جامح للغاية. قبل قرن من الزمان، كان مدار أوتيرما يقع خارج مدار المشتري بمسافة بعيدة. وبعد لقاء تقاربي، تبدَّل مداره وصار بداخل مدار المشتري. وبعد ذلك، تبدَّل وصار خارجه مرة أخرى. سيستمر أوتيرما في تغيير مداره كل بضعة عقود، وليس ذلك لأنه يخرق قانون نيوتن؛ بل لأنه يتبعه. يقع مدار أوتيرما داخل أنبوبين يلتقيان بالقرب من المشتري. يقع أحد الأنبوبين داخل مدار المشتري، ويقع الآخر خارجه. وعند نقطة الالتقاء، إما أن يبدِّل المذنَّب الأنبوبتين أو لا يبدلهما، تبعًا للتأثيرات الفوضوية لجاذبية المشتري والشمس. بالرغم من ذلك، فور أن يصير أوتيرما بداخل أحد الأنبوبين، فإنه يظل عالقًا هناك إلى أن يعود الأنبوب لنقطة الالتقاء. كقطار لا بد له أن يبقى على القضبان لكنه يستطيع تغيير مساره إلى مجموعة



على اليسار: نظام أنابيب أوتيرما. على اليمين: صورة مقرَّبة لمنطقة التبديل.

أخرى من القضبان إذا بدَّل أحد النقاط، يتمتع أوتيرما ببعض الحرية في تغيير خط سيره، لكنها حرية محدودة.

لقد أدرك بناة السكك الحديدية في العصر الفيكتوري أهمية الاستفادة من السمات الطبيعية للأرض. فمدُّوا السكك الحديدية عبر الوديان وعلى طول الخطوط المحيطية، وحفروا الأنفاق في التلال لتفادي سير القطار على قممها. إنَّ تسلُّق تل في اتجاه معاكس للجاذبية يكلِّف الكثير من الطاقة. وتظهر هذه التكلفة في زيادة استهلاك الوقود التي تكلِّف بدورها المال. ينطبق الأمر نفسه على السفر بين الكواكب، لكنَّ منظر الطاقة يتغير مع حركة الكوكب. وهو يتخذ أبعادًا كثيرة للغاية على عكس موقع القطار الذي لا يتخذ سوى بُعدين. تمثل هذه الأبعاد كميتين فيزيائيتين مختلفتين؛ الموقع والسرعة المتجهة. تسافر المركبات الفضائية عبر منظر رياضي ذي ستة أبعاد لا بُعدين. وتُعد الأنابيب ونقاط التقائها من السمات الخاصة لمنظر الجاذبية في النظام الشمسي.

تتضمن المناظر الطبيعية تلالًا وأودية. ويستهلك تسلُّق أحد التلال قدرًا من الطاقة، لكنَّ القطار يمكن أن يكتسب طاقة من خلال الانحدار إلى أحد الوديان. ثمَّة نوعان من الطاقة يؤديان دورًا في هذا السياق. فالارتفاع فوق سطح البحر يحدِّد طاقة وضع القطار التي تعود إلى قوة الجاذبية. ولدينا أيضًا طاقة الحركة التي تتناظر مع السرعة. حين

ينحدر قطارٌ ما على أحد الوديان ويتسارع، يبادل بطاقة الوضع طاقة حركية. وحين يتسلق تلًّا ويبطئ، تسير عملية التبادل في الاتجاه المعاكس. يظل إجمالي الطاقة ثابتًا؛ ومن ثمَّ تتبع الحركة خطًّا محيطيًّا في منظر الجاذبية. غير أنَّه يوجد مصدر ثالث للطاقة في القطارات: الوقود. فمن خلال حرق وقود الديزل أو استهلاك الطاقة الكهربية، يمكن للقطار تسلُّق سطح مائل أو الإسراع، محرِّرًا نفسه من مساره الطبيعي حر الجريان. لا بد لإجمالي الطاقة أن يظل ثابتًا في جميع الأحيان، وما سوى ذلك كله قابل للتفاوض.

ينطبق الأمر نفسه تقريبًا في حالة مركبات الفضاء. فمجالات جاذبية الشمس والكواكب وغيرها من الأجرام توفِّر طاقة الوضع. وتتناظر سرعة مركبة الفضاء مع الطاقة الحركية. وتضيف طاقتها المحركة مصدرًا آخر للطاقة يمكن تشغيله أو إيقافه حسب الرغبة. تؤدي الطاقة دور الارتفاع في المنظر الطبيعي، ويُعد المسار الذي تتبعه مركبة الفضاء خطًّا محيطيًّا من نوعٍ ما، ويظل إجمالي الطاقة ثابتًا على مداره. الأمر الأهم أنه لا يلزم التقيد بخط محيطيٍ محدَّد؛ إذ يمكن استهلاك قدر إضافي من الوقود للانتقال إلى آخر، والتحرك إلى «أعلى التل»، أو «أسفله».

ما يهم لنجاح هذا الأمر هو القيام به في المكان الصحيح. لقد كان مهندسو السكك الحديدية في العصر الفيكتوري يعون جيدًا أنَّ التضاريس الأرضية تتسم بسمات مميزة، مثل قمم التلال وقيعان الوديان، وشكل السروج الذي تتخذه الممرات الجبلية. لهذه السمات المميزة أهميتها؛ فهي تشكِّل هيكلًا عظميًّا للشكل الهندسي الكلي الذي تتخذه المخططات المحيطية. فبالقرب من قمة على سبيل المثال، تشكِّل المخطَّطات المحيطية منحنًى مغلقًا. وفي القمم، تبلغ طاقة الوضع أقصى حد لها موضعيًّا، وتكون في أدنى حد لها موضعيًّا في الوديان. أما الممرات الجبلية فتجتمع فيها سمات من الاثنين؛ إذ تبلغ الحد الأقصى في بعض الاتجاهات وتبلغ الحد الأدنى في اتجاهات أخرى، وهي تتيح لنا عبور الجبال بأقل كلفة من المجهود.

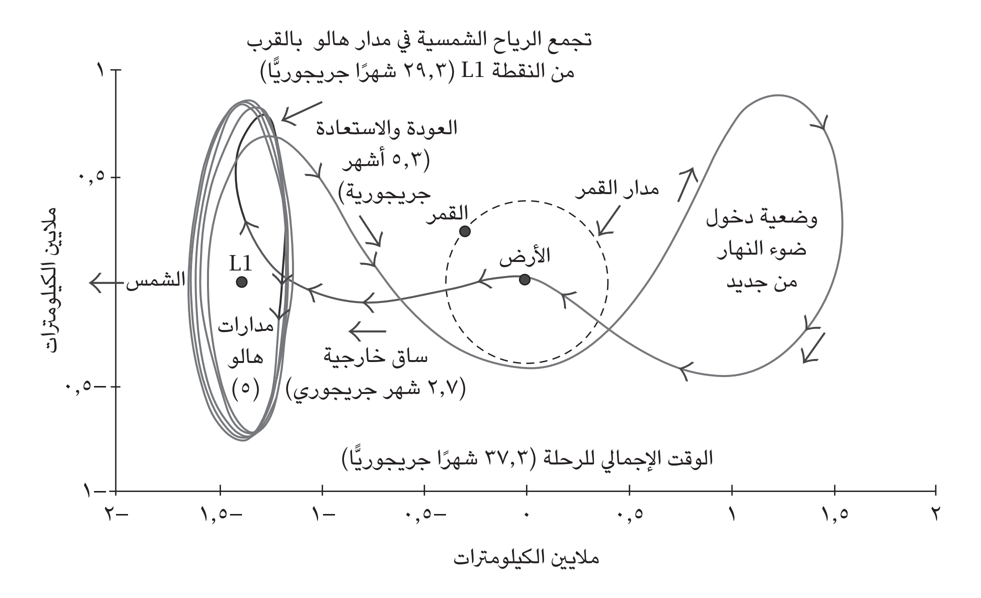
ينطبق الأمر نفسه على منظر الجاذبية في النظام الشمسي إذ يتخذ سمات خاصة. أبرز هذه السمات هي الشمس والكواكب والأقمار التي توجد في قاع آبار الجاذبية. ثمَّة سمة أخرى أقل وضوحًا لكنها على القدر نفسه من الأهمية، وهي قمم التلال وقيعان الوديان والممرات الجبلية، التي توجد في منظر الجاذبية. تنظم هذه السمات الشكل الهندسي الكلي، الذي يشكل بدوره الأنابيب. وأكثر السمات المعروفة في منظر الجاذبية بخلاف آبار الجاذبية، هي نقاط لاجرانج.

قرابة عام ١٩٨٥، ابتكر إدوارد بيلبرونو استخدام الديناميكيات الفوضوية في التخطيط للبعثات، وقدَّم ما سُمِّي حينها بنظرية الحدود الضبابية. لقد أدرك أنَّ الأنابيب حين تقترن بالفوضى، تحدِّد مسارات جديدة تتسم بكفاءة الطاقة تربط بين عالم وآخر. تُبنى هذه المسارات من قطع من المدارات الطبيعية التي توجد في أنظمة ثلاثية الأجرام، والتي تتخذ سمات جديدة مثل نقاط لاجرانج. ومن الطرق التي يمكن إيجاد هذه المسارات بها، البدء من المنتصف ومتابعة العمل إلى الخارج. تخيَّل مركبة فضائية تقبع على نقطة الأرض/القمر L1، بين الجِرمين. إذا تعرضت لدفعة ضئيلة، فسوف تبدأ بالجري «إلى الأسفل» بينما تفقد طاقة الوضع وتكتسب طاقة حركية. بعض الدفعات سترسلها في اتجاه الأرض وستدور في نهاية المطاف بكوكبنا. وبعض الدفعات الأخرى سترسلها باتجاه القمر في مدار قبض قمري. ومن خلال عكس المسار من النقطة L1 إلى الأرض، والتزام مسار ملائم من النقطة L1 إلى القمر، نحصل على مسارٍ عالي الكفاءة من الأرض إلى القمر يتقاطع مع النقطة L1.

الحق أنَّ النقطة L1 مكان رائع لإجراء بعض التغييرات الطفيفة في المسار. فالديناميكيات الطبيعية للمركبة الفضائية تكون فوضوية بالقرب من L1؛ ومن ثمَّ فسوف تؤدي التغييرات الشديدة الصغر في الموقع أو السرعة إلى إجراء تغييراتٍ كبيرةٍ في المسار. من خلال الاستفادة من الفوضى، يمكننا إعادة توجيه المركبة الفضائية إلى وجهات أخرى بطريقةٍ تتسم بالكفاءة في استهلاك الوقود، وإن كانت بطيئة على الأرجح.

استُخدِمت خدعة الأنبوب لأول مرة في عام ١٩٨٥ لإعادة توجيه المسبار المستكشِف الدولي «إنترناشونال صن-إيرث إكسبلورَر ISEE-3»، الذي كان قد أوشك على الفناء، للالتقاء بالمذنَّب «جياكوبيني-زينر». وفي عام ١٩٩٠، تواصل بيلبرونو مع وكالة الفضاء اليابانية بشأن مسبار تابع لها يُسمى «هيتِن»، وكان قد أكمل مهمته الأساسية ولم يتبقَّ به سوى القليل من الوقود. قدَّم بيلبرونو مسارًا سيوقفه مؤقتًا في مدار القمر، ثم يعيد توجيهه إلى النقطتين L4 وL5 للبحث عن جسيمات غبار حبيسة. استُخدِمَت الخدعة نفسها مرةً أخرى في بعثة «جينيسيس» التي كانت تهدف لإحضار عينات من جسيمات الرياح الشمسية.[5]

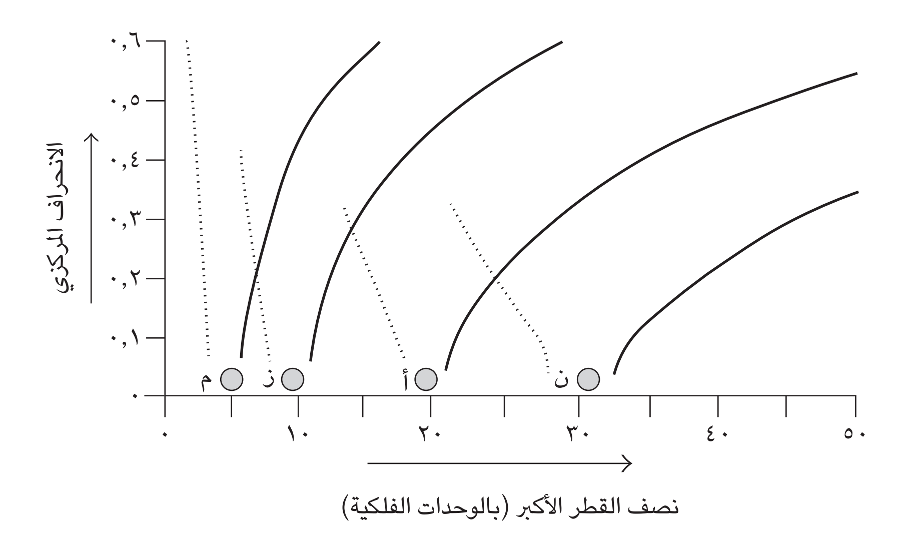
لقد حاول الرياضيون والمهندسون الذين كانوا يرغبون في تكرار تلك الخدعة والتوصل إلى خدعٍ أخرى من النوع نفسه، أن يفهموا السبب الحقيقي وراء نجاحها. توجَّهوا مباشرةً نحو تلك الأماكن المميزة في منظر الطاقة، والتي تناظر الممرات الجبلية.



مسار بعثة جينيسيس.

تمثل هذه الأماكن «أعناق زجاجات» لا بد للمسافرين المستقبليين من عبورها. ثمَّة ممرات «وفود» محدَّدة وممرات «مغادرة» محدَّدة أيضًا، تتناظر مع المسارات الطبيعية التي توجد في الممرات. ولاتباع مسارات الوفود والمغادرة هذه على نحوٍ دقيق، لا بد من السفر بالسرعة المناسبة تمامًا. بالرغم من ذلك، إذا اختلفت سرعتك بدرجة طفيفة، يمكنك أن تظل قريبًا من تلك المسارات. ومن أجل تخطيط ملف للبعثة يتسم بالكفاءة، ينبغي تحديد الأنابيب ذات الصلة. تسير المركبة الفضائية عبر أول أنبوب للوفود، وحين تصل إلى نقطة لاجرانج، تعيد دفعة سريعة من المحركات توجيهها عبر أنبوب للمغادرة. يتدفَّق بها هذا الأنبوب نحو آخر للوفود، وهكذا دواليك.

في عام ٢٠٠٠، قام كلٌّ من وانج سانج كون، ومارتن لو، وجيرولد مارسدن، وشين روس، باستخدام الأنابيب لتصميم جولة لأقمار المشتري، مع دفع جذبوي بالقرب من «جانيميد» متبوع برحلة أنبوبية إلى أوروبا. وثمَّة مسار آخر أكثر تعقيدًا ويستلزم قدرًا أقل من الطاقة، يتضمن «كاستيلو» أيضًا. يستخدم هذا المسار ديناميكيات أجسام خمسة: المشتري والأقمار الثلاثة والمركبة الفضائية.



المسارات المنخفضة الطاقة للكواكب الخارجية الأربعة: (المشتري (م)، وزحل (ز)، وأورانوس (أ)، ونبتون (ن))، المسارات المرتبطة بالنقطة L1 (بالخطوط المقطعة)، والمسارات المرتبطة بالنقطة L2 (بالخطوط المتواصلة). أما مسارات الكواكب الداخلية فهي أصغر كثيرًا من أن تظهر على هذا النطاق. توفِّر نقاط التقاطع، حيث تلتقي الأنابيب المحيطة، نقاط تبديل لمدارات النقل المنخفضة الطاقة.

وفي عام ٢٠٠٢، حسب لو وروس المسارات الطبيعية الموجودة في منظر الجاذبية، والتي تؤدي إلى الاقتراب من النقطتين L1 وL2 لكواكب النظام الشمسي والابتعاد عنهما، ووجدا أن أحدها يقطع الآخر. توضح الصورة هذه المسارات في مقطع بوانكاريه. فالمنحنى المتقطع المنبثق من زحل (ز) يقطع المنحنى المتصل المنبثق من المشتري (م)، مما يشكِّل مدار نقل منخفض الطاقة بين الكوكبين المعنيين. ينطبق الأمر نفسه على التقاطعات الأخرى. ومن ثمَّ؛ إذا بدأت مركبة فضائية من زحل، فيمكن أن تنتقل بكفاءة إلى أورانوس، ثم إلى زحل، ثم إلى المشتري، مع التبديل بين النقطتين L1 وL2 في كل كوكب. يمكن الاستمرار في العملية نفسها وصولًا إلى الكواكب الداخلية في النظام الشمسي، ويمكن أيضًا عكسها إلى الخارج خطوة بخطوة. وهذا هو الهيكل الرياضي للطريق السريع بين الكواكب.

في عام ٢٠٠٥، قام كلٌّ من مايكل ديلنيتس، وأوليفر يونج، وماركوس بوست، وبيانكا ثير، باستخدام الأنابيب للتخطيط لبعثة من الأرض إلى الزهرة تتسم بكفاءة الطاقة. يربط

الأنبوب الأساسي نقطة L1 للشمس/الأرض بنقطة L2 للشمس/الزهرة. وللمقارنة، لا يستخدم هذا المسار سوى ثلث الوقود الذي استلزمته بعثة «فينوس إكسبريس» التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية؛ إذ يستطيع استخدام محركات منخفضة الدفع، لكنَّ ثَمن هذا هو إطالة وقت العبور من ١٥٠ يومًا إلى ما يقرب من ٦٥٠ يومًا.

ربما يزيد تأثير الأنابيب عن ذلك. فقد اكتشف ديلينتس نظامًا طبيعيًّا من الأنابيب يربط المشتري بكلٍّ من الكواكب الداخلية. يشير ذلك إلى أنَّ المشتري، وهو الكوكب المهيمن في النظام الشمسي، يؤدي دور «المحطة الفضائية المركزية الكبرى». فثمَّة احتمال كبير بأن تكون أنابيبه هي التي نظَّمت تكوين النظام الشمسي بأكمله، محدِّدةً بذلك المسافات التي تفصل بين الكواكب الداخلية. إنَّ هذا الاحتمال لا يفسِّر قانون تيتيوس–بوديه ولا حتى يؤيده، وإنما يوضح أنَّ التنظيم الحقيقي للأنظمة الكوكبية ينبع من الأنماط الخفية للديناميكيات غير الخطية.

الفصل الحادي عشر

كرات عظيمة من النيران

«ربما نحدِّد أشكال الكواكب ومسافاتها وأحجامها وحركاتها، لكننا لن نستطيع أبدًا أن نعرف أيَّ شيء عن تركيبها الكيميائي.»

أوجست كونت، (الفلسفة الإيجابية)

على ضوء ما اكتسبناه لاحقًا من معارف، يسهل علينا أن نهزأ من كونت المسكين، غير أنه لم يكن أحدٌ يتصوَّر على الإطلاق في عام ١٨٣٥ أننا سنستطيع معرفة تركيب كوكبٍ ما، فضلًا عن نجم. يخص كونت «الكواكب» بالذكر في هذه العبارة، لكنه يذكر في موضع آخر أنَّ معرفة التركيب الكيميائي لنجمٍ ما ستكون أكثر صعوبة. لقد كانت فكرته الأساسية هي وجود حدود لما يمكن للعلم أن يكتشفه.

مثلما يحدث غالبًا حين يعلن باحثون مرموقون استحالة شيءٍ ما، كانت فكرة كونت الأعمق صحيحة، لكنه اختار المثال الخاطئ تمامًا. فعلى عكس المتوقَّع، يُعد التركيب الكيميائي لنجمٍ ما، حتى وإن كان يقع على بُعد آلاف السنين الضوئية، أحدَ أسهل خصائصه التي يمكن رصدها. وإذا كنت لا ترغب في معرفة الكثير جدًّا من التفاصيل، فإنَّ الأمر نفسه ينطبق على المجرات التي تقع على بُعد ملايين السنين الضوئية. يمكننا أيضًا أن نعرف الكثير عن الأغلفة الجوية للكواكب التي تسطع عن طريق ضوء النجوم المنعكس.

تثير النجوم الكثير من الأسئلة علاوةً على الأسئلة المتعلقة بتركيبها. ما النجوم، وكيف تضيء، وكيف تتطور، وما المسافة التي تبعدها؟ من خلال الجمع بين الملاحظات والأنماط الرياضية، استنتج العلماء إجابات عن كل هذه الأسئلة، بالرغم من أنَّ زيارة نجم أمرٌ

محال في واقع الأمر بالتقنيات المتاحة اليوم. أما الحفر بداخل أحدها فهو أمر أصعب كثيرًا.

جاء الاكتشاف الذي حطَّ من قيمة مثال كونت مصادفة. بدأ جوزيف فراونهوفر حياته العملية متدربًا لصناعة الزجاج، وكاد أن يلقى حتفه حين انهارت ورشته. غير أنَّ ماكسيميليان الرابع جوزيف، الأمير المنتخب لبافاريا، أنقذ الشاب وأُعجِب به؛ فموَّل تعليمه. صار فراونهوفر خبيرًا في صناعة الزجاج للآلات البصرية، وأصبح بعد ذلك مديرًا لمعهد البصريات في بينيديكتبيورن. بنى العديد من التلسكوبات العالية الدقة والمجاهر، لكنَّ إنجازه العلمي الأكثر تأثيرًا جاء في عام ١٨١٤ حين اخترع آلة جديدة هي منظار التحليل الطيفي.

عمل نيوتن في مجال البصريات إضافة إلى عمله في مجال الميكانيكا والجاذبية، واكتشف أنَّ المنشور يقسم الضوء الأبيض إلى الألوان المكوِّنة له. توجد طريقة أخرى لتقسيم الضوء هي استخدام محزز الحيود، وهو سطحٌ مستوٍ يحتوي على خطوط محززة متقاربة. تتداخل موجات الضوء المنعكسة من محزز الحيود بعضها مع بعض. وتشير هندسة الموجات إلى أنَّ الضوء عند طول موجي محدَّد (أو تردُّد ما؛ أي سرعة الضوء مقسومة على الطول الموجي) ينعكس بأقوى صورة عند زوايا محددة. عند هذه الزوايا، تتزامن قمم الموجات فتعزز إحداها الأخرى. على العكس من ذلك، لا ينعكس أي ضوء على الإطلاق تقريبًا عند الزوايا التي تتداخل عندها الموجات على نحوٍ تحطيمي؛ إذ تلتقي قمة إحدى الموجات بقاع موجة أخرى. جمع فراونهوفر بين المنشور ومحزز الحيود والتلسكوب لابتكار آلة يمكن أن تقسم الضوء إلى مكوناته وتقيس أطوالها الموجية بدقة عالية.

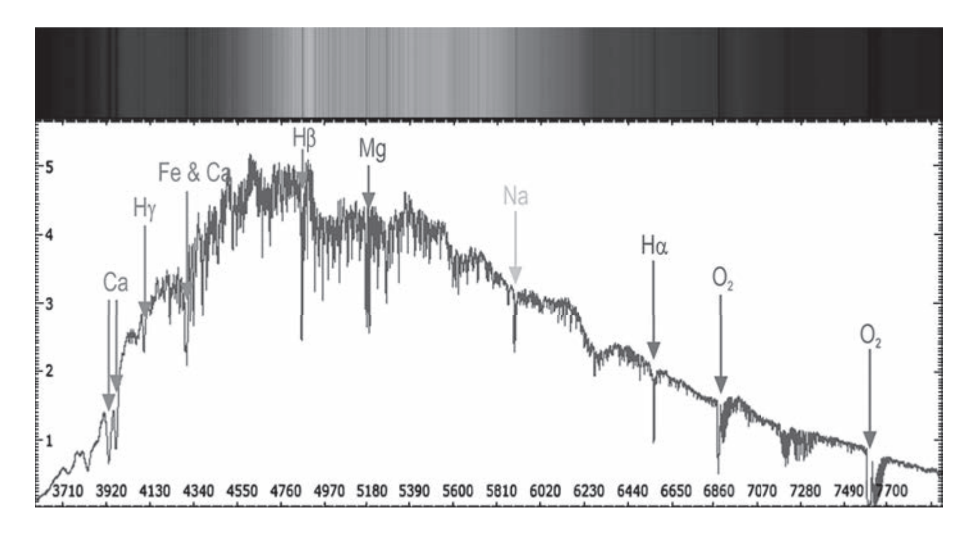
من بين اكتشافاته الأولى أنَّ الضوء المنبعث من نارٍ يتسم بدرجة لون برتقالية مميِّزة له. تساءل فراونهوفر عمَّا إذا كانت الشمس في جوهرها كرةً من النار؛ فوجَّه منظاره الطيفي إليها بحثًا عن ضوءٍ يتسم بذلك الطول الموجي. وبدلًا من ذلك، رصد طيفًا كاملًا من الألوان مثلما حدث مع نيوتن من قبل، لكنَّ آلته كانت شديدة الدقة حتى إنها كشفت عن وجود خطوط سوداء غامضة عند العديد من الأطوال الموجية. كان ويليام ولاستون قد لاحظ وجود ستة من هذه الخطوط في وقت سابق، أما فراونهوفر فقد وجد ٥٧٤ خطًّا في نهاية المطاف.

بحلول العام ١٨٥٩، كان الفيزيائي جوستاف كيرشوف والكيميائي روبرت بنزن الذي اشتُهِر بموقده، قد أوضحا أنَّ هذه الخطوط تظهر لأنَّ ذرات العديد من العناصر تمتص الضوء الصادر عن أطوال موجية معينة. لقد اختُرِع موقد بنزن لقياس هذه الأطوال الموجية في المختبر. إذا كنت تعرف الأطوال الموجية التي ينتجها البوتاسيوم على سبيل المثال، ووجدت خطًّا مناظِرًا في طيف الشمس، فلا بد أنَّ الشمس تحتوي على البوتاسيوم. طبَّق فراونهوفر هذه الفكرة على «سيريس»، ورصد بها أول طيف نجمي. حين نظر إلى نجوم أخرى، لاحظ أنَّ لديها أطيافًا مختلفة. لقد كان أثر ذلك عظيمًا؛ إذ لم يكن يعني أننا نستطيع معرفةَ ما تتركب منه النجوم فحسب؛ بل يعني أيضًا أنَّ النجوم المختلفة تتركب من أشياء مختلفة.

وُلِد فرع جديد من فروع علم الفلك هو التحليل الطيفي النجمي.

ثمَّة آليتان أساسيتان تشكلان الخطوط الطيفية. يمكن للذرات أن تمتص الضوء الصادر عن طول موجي معيَّن فتشكِّل بذلك خط امتصاص، أو يمكن أن تبعثه فتشكِّل خط انبعاث. فاللون الصفراوي المميِّز لمصابيح الصوديوم المستخدمة في إضاءة الشوارع، هو خط انبعاث الصوديوم. من خلال العمل معًا في بعض الأحيان، أو عمل كل بمفرده في أحيان أخرى، استخدم كيرشوف وبنزن أسلوبهما لاكتشاف عنصرين جديدين هما السيزيوم والروبيديوم. بعد ذلك بفترة قصيرة، تفوَّق عليهما فلكيان آخران هما جول يانسن ونورمان لوكير؛ إذ اكتشفا عنصرًا، لم يكن قد اكتُشِف على الأرض إطلاقًا في ذلك الوقت.

في عام ١٨٦٨، كان يانسن في الهند يرصد كسوفًا شمسيًّا أملًا في التوصل إلى التركيب الكيميائي للغلاف اللوني للشمس. توجد هذه الطبقة في الغلاف الجوي للشمس، وتقع مباشرة فوق الطبقة الظاهرة التي تُعرف بالغلاف الضوئي. إنَّ طبقة الغلاف اللوني رقيقة للغاية حتى إنه لا يمكن ملاحظتها إلا في أثناء كسوف كلي، حين تتخذ لونًا محمرًّا. تشكل طبقة الغلاف الضوئي خطوط الامتصاص، بينما تشكل طبقة الغلاف اللوني خطوط الانبعاث. وجد يانسن خط انبعاث (أي أنه صادر من الغلاف اللوني)، كان يتخذ لونًا أصفر فاقعًا للغاية، ويبلغ طوله الموجي ٥٨٧٫٤٩ نانومترًا، واعتقد أنه يتناظر مع الصوديوم. بعد ذلك بفترة قصيرة، سمَّاه لوكير بالخط الطيفي D_3؛ لأنَّ الصوديوم يتناظر مع خطين عند طولين موجيين متشابهين، وهما الخطان D_1، D_2. غير أنه لا يتناظر مع أي خط عند الطول الموجي D_3، مما يعني أنَّ ذلك الخط لا يشير إلى الصوديوم.



طيف أحد النجوم. الجزء العلوي: مثلما يظهر في منظار التحليل الطيفي. الجزء السفلي: السطوع عند كل طول موجي. خطوط الامتصاص الموضحة هي (من اليسار إلى اليمين) الكالسيوم، وهيدروجين جاما، والحديد والكالسيوم، وهيدروجين بيتا، والماغنسيوم، والصوديوم، وهيدروجين ألفا، والأكسجين، والأكسجين.

الحق أنه لم يكن ثمَّة ذرة معروفة تتناظر مع ذلك الخط. أدرك لوكير أنهما قد عثرا على عنصر لم يكن معروفًا من قبل. سمَّاه هو والكيميائي إدوارد فرانكلاند، هيليوم، وقد اشتقا الاسم من الكلمة اليونانية helios، والتي تعني «الشمس». وفي عام ١٨٨٢، عثر لويجي بالميري على خط D_3 على الأرض في عينة من الحمم البركانية من بركان جبل فيسوفيوس. وبعد ذلك بسبع سنوات، حصل ويليام رامزي على عينات من الهيليوم من خلال وضع حمض على معدن يُسمى كليفايت، ويحتوي في تركيبه على اليورانيوم مع عدد من عناصر «الأرض النادرة». اتضح أنَّ الهيليوم غازٌ في درجة حرارة الغرفة.

تُعد هذه القصة كيميائية في معظمها حتى هذه النقطة، بخلاف نظرية الحيود. غير أنَّ القصة اتخذت آنذاك منحًى غيرَ متوقع، مما أدخلها إلى مملكة فيزياء الجسيمات التي تنطوي على درجة كبيرة من الرياضيات. ففي عام ١٩٠٧، كان إرنست رذرفورد وتوماس رويدز يدرسان جسيمات ألفا التي تنبعث من المواد الإشعاعية. ولمعرفة ماهيتها، حبساها في أنبوب زجاجي لا يحتوي على أي شيء على الإطلاق. محض فراغ. مرت الجسيمات

عبر جدار الأنبوب، لكنها فقدت الطاقة ولم تستطِع الخروج مجددًا. كان طيف محتويات الأنبوب يتضمن خط D_3 قويًّا. فجسيمات ألفا هي النواة الذرية للهيليوم.

ولاختصار قصة طويلة، سنكتفي بالقول إنَّ الجهود المجتمعة لهؤلاء العلماء قد أدت إلى اكتشاف ثاني أكثر العناصر شيوعًا في الكون بعد الهيدروجين. غير أنَّ الهيليوم ليس شائعًا «هنا». فنحن نحصل على القدر الأكبر منه من خلال تقطير الغاز الطبيعي. للهيليوم العديد من الاستخدامات العلمية المهمة، مثل بالون الطقس، وفيزياء درجة الحرارة المنخفضة، وماسحات التصوير بالرنين المغناطيسي التي تُستخدم للأغراض الطبية. ومن المحتمل أن يُستخدم أيضًا وقودًا أساسيًّا في مفاعلات الاندماج إذا تمكَّن العلماء من استخدامه بنجاح؛ إذ إنه رخيص ويُعد أحد أشكال الطاقة الآمنة نسبيًّا. فعلامَ نهدر هذا العنصر الضروري؟ البالونات اللعبة في حفلات الأطفال.

يوجد معظم الهيليوم في النجوم والغيوم الغازية فيما بين النجوم. ذلك أنه قد تشكَّل في الأصل في المراحل الأولى من الانفجار العظيم، وهو أيضًا الناتج الأساسي لتفاعلات الاندماج في النجوم. ونحن لا نراه في الشمس لأنها لا تتكوَّن منه فحسب، إضافةً إلى الكثير من الهيدروجين والكثير من العناصر الأخرى بكميات أقل: إنه يصنعها من الهيدروجين.

تتكوَّن ذرة الهيدروجين من بروتون واحد وإلكترون واحد. وتتكوَّن ذرة الهيليوم من اثنين من البروتونات واثنين من النيوترونات واثنين من الإلكترونات، ويلغي جسيم ألفا الإلكترونين. في النجوم، تُنزع الإلكترونات وتقتصر التفاعلات على نواة الذرة. وفي باطن الشمس حيث تبلغ درجة الحرارة ١٤ مليون كلفن، تنسحق أربع ذرات من الهيدروجين معًا؛ أي أربعة بروتونات، بفعل قوى الجاذبية الضخمة. تتحد هذه البروتونات معًا لتكوين جسيم ألفا واحد، واثنين من أجسام البوزيترون واثنين من أجسام النيوترينو، والكثير من الطاقة. يسمح اثنان من أجسام البوزيترون بأن يتحول اثنان من البروتونات إلى اثنين من النيوترونات. ينبغي لنا أن نتناول مكوِّن الكواركات عند مستوًى أعمق، لكنَّ هذا الوصف يكفي. إنَّ تفاعلًا مشابهًا لهذا يؤدي إلى انفجار «قنبلة هيدروجينية» بقوة مدمِّرة، وتنطلق الطاقة بسبب هذا التفاعل، لكنها تتضمن نظائر أخرى للهيدروجين: الديوتريوم والتريتيوم.

إنَّ المراحل الأولى من فرع جديد في العلوم شديدةُ الشبه بجمع الفراشات: أمسِك بكلِّ ما تستطيع الإمساك به، ثم حاول ترتيب عيناتك على نحوٍ منطقي. قام علماء التحليل

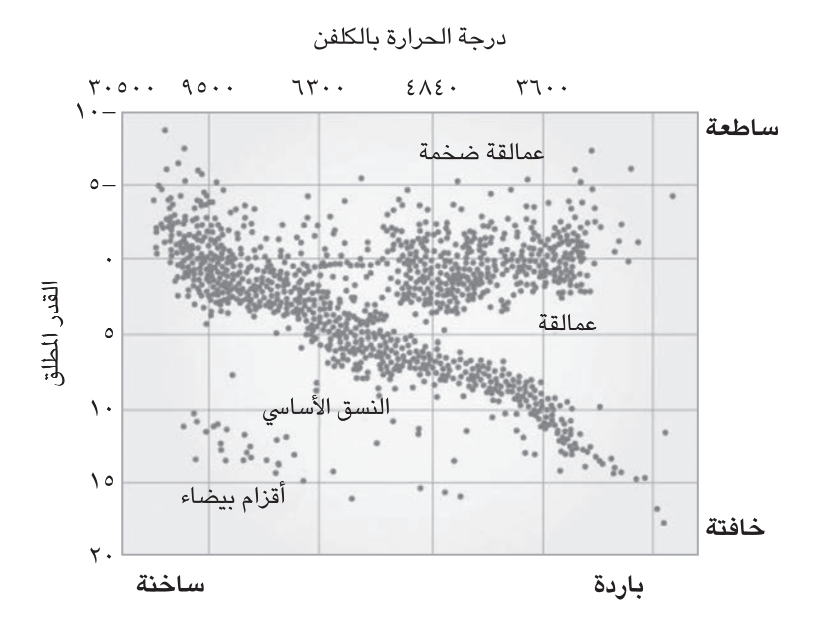
الطيفي بجمع الأطياف النجمية، وصنَّفوا النجوم وفقًا لها. في عام ١٨٦٦، استخدم أنجلو سيكي الأطياف لتقسيم النجوم إلى ثلاث فئات مختلفة وفقًا لألوانها السائدة على وجه التقريب: فئة الأبيض والأزرق، وفئة الأصفر والبرتقالي، وفئة الأحمر. وبعد ذلك أضاف فئتين أخريين.

قرابة العام ١٨٨٠، بدأ بيكرينج إجراء مسح عن الأطياف النجمية نُشِر في عام ١٨٩٠. وقامت ويليامينا فليمينج بالقدر الأكبر من التصنيفات اللاحقة باستخدام نسخة منقحة من نظام سيكي، يُرمز فيه بالحروف الأبجدية الإنجليزية من A إلى Q. وبعد سلسلة معقَّدة من المراجعات، ظهر نظام مورجان-كينان المعمول به حاليًّا، والذي يستخدم الحروف التالية: O وB وA وF وG وK وM. تتسم النجوم من النوع O بأعلى درجة حرارة في أسطحها، أما النوع M فهو الأقل في درجة الحرارة. ينقسم كل نوع منها إلى أنواع أصغر تُرقَّم بالأعداد من ٠ إلى ٩، بحيث تقل درجة الحرارة مع زيادة العدد. يُعد لمعان النجم من المتغيرات الأساسية في التصنيف أيضًا؛ أي «سطوعه» الذاتي عند جميع الأطوال الموجية، ويُقاس بإجمالي الإشعاع الذي يصدره في كل ثانية.[1] تُصنَّف النجوم وفقًا للمعانها أيضًا، وغالبًا ما يُرمز لفئة لمعانها بعدد روماني، إذن فلهذا النظام معلَمان يتناظران على وجه التقريب مع درجة الحرارة واللمعان.

تتسم نجوم الفئة O على سبيل المثال بأنَّ درجة حرارة سطحها تزيد على ٣٠٠٠٠ درجة كلفن، وأنها تبدو للعين باللون الأزرق، وتبلغ كتلتها ١٦ ضعفًا من كتلة الشمس، وتظهر بها خطوط هيدروجين ضعيفة، وهي نادرة للغاية. أما نجوم الفئة G، فتتراوح درجة حرارة سطحها بين ٥٢٠٠ كلفن و٦٠٠٠ كلفن، وتتخذ اللون الأصفر الشاحب، وتتراوح كتلتها بين ٠,٨ و١,٠٤ من كتلة الشمس، وتظهر بها خطوط هيدروجين ضعيفة، وهي تشكل ٨٪ من جميع النجوم المعروفة. تنتمي شمسنا إلى هذه الفئة من النجوم؛ فهي من النوع G2. تتراوح درجة حرارة سطح نجوم الفئة M بين ٢٤٠٠ درجة كلفن و٣٧٠٠ درجة كلفن، وهي تتسم بلون أحمر يميل إلى البرتقالي، وتتراوح كتلتها بين ٠,٠٨ و٠,٤٥ كتلة الشمس، وتظهر بها خطوط هيدروجين ضعيفة للغاية، وهي تشكِّل ٧٦٪ من جميع النجوم المعروفة.

يرتبط لمعان النجم بحجمه، وتتخذ فئات اللمعان المختلفة أسماءً تبدأ من العمالقة الفائقة، إلى العمالقة الضخمة، إلى العمالقة، ثم أشباه العمالقة، ثم الأقزام (أو نجوم النسق الأساسي)، ثم أشباه الأقزام. وبهذا، يمكن وصف أحد النجوم بأنه عملاق أزرق، أو قزم أحمر، وما إلى ذلك.

إذا مثَّلتَ درجة حرارة النجوم ولمعانها على مخططٍ ما، فلن تحصل على مجموعة عشوائية من النقاط المتفرقة. بل إنك ستحصل على شكلٍ أشبه بحرف Z عكسي. وهذا هو مخطط هرتزبرونج-راسل الذي قدَّمه كلٌّ من أينار هرتزبرونج وهنري راسل عام ١٩١٠. أبرز ما يتضح في هذا المخطط مجموعة ساطعة من النجوم العمالقة والعمالقة الضخمة في الجزء العلوي على اليمين، وخط منحنٍ قطري من نجوم «النسق الأساسي» تتنوع بين النجوم الساخنة الساطعة والنجوم الباردة الخافتة، ومجموعة متفرقة من الأقزام البيضاء الساخنة الخافتة على الجزء السفلي يسارًا.



مخطط هرتزبرونج-راسل. يرتبط القدر المطلق باللمعان؛ إذ تكون النجوم شديدةَ السطوع عند −١٠ وشديدة الخفوت عند +٢٠.

تجاوزت دراسة الأطياف النجمية طور جمْع الفراشات حين بدأ العلماء في استخدامها لمعرفة كيفية إنتاج النجوم لضوئها وغير ذلك من أنواع الإشعاع. وسرعان ما أدركوا أنَّ النجوم لا تقتصر على كونها شعلة عظيمة من النيران. ذلك أنه لو كان مصدر طاقتها هو تفاعلات كيميائية عادية، لكانت الشمس قد احترقت إلى رماد قبل زمن بعيد. اقترح

مخطط هرتزبرونج-راسل أنَّ النجوم يمكن أن تتطور أيضًا على طول حرف Z العكسي من أعلى اليمين إلى أسفل اليسار. بدا الأمر منطقيًّا: تولد في فئة العمالقة، ثم تتضاءل إلى أقزام، ثم تتحوَّل إلى فئة النسق الأساسي لتصبح من أشباه الأقزام. ومع تضاؤلها، تحوِّل طاقة الجاذبية إلى إشعاع، وهي عملية تُسمَّى بآلية كلفن-هيلمهولتز. ومن هذه النظرية، استنتج علماء الفلك في عشرينيات القرن العشرين أنَّ عمر الشمس يبلغ عشرة ملايين عام، مما أثار حنق الجيولوجيين وعلماء الأحياء التطورية الذين كانوا مقتنعين بأنها أقدم من ذلك كثيرًا.

لم يستسلم علماء الفلك حتى ثلاثينيات القرن العشرين؛ إذ أدركوا أنَّ النجوم تكتسب معظم طاقتها من التفاعلات النووية لا انهيار الجاذبية، وأنَّ المسار التطوري المقترَح خاطئ. ووُلِد مجال جديد من مجالات العلوم هو الفيزياء الفلكية. يوظِّف هذا المجال النماذج الرياضية المعقَّدة في تحليل ديناميكيات النجوم وتطورها بدايةً من لحظة الميلاد إلى لحظة الموت. وتُستَخلص المكونات الأساسية لهذه النماذج من الفيزياء النووية وعلم الديناميكا الحرارية.

لقد تعرفنا في الفصل الأول على كيفية تشكُّل النجوم حين تنهار غيمة بدائية شاسعة من الغاز تحت وطأة جاذبيتها. وقد ركزنا حينها على الجزء المتعلق بالديناميكا، لكنَّ التفاعلات النووية تضيف تفاصيل جديدة. يصدر الانهيار طاقة جذبوية تؤدي إلى تسخين الغاز لتشكيل نجم بدائي يتمثَّل في جسم شبيه بالكرة من الغاز الدوَّار. والمكوِّن الأساسي له هو الهيدروجين. إذا بلغت درجة الحرارة عشرة ملايين درجة كلفينية، فستبدأ أنوية الهيدروجين-البروتونات في الاندماج معًا؛ فتنتج الديوتيريوم والهيليوم. إنَّ النجوم البدائية التي تقل كتلتها الابتدائية عن ٠٫٠٨ من كتلة شمسنا لا تبلغ هذه الدرجة من السخونة أبدًا، وتفتر لتشكِّل أقزامًا بنية. تسطع هذه النجوم على نحوٍ خافت بفعل ضوء اندماج الديوتيريوم في الغالب، ثم تختفي.

أما النجوم التي تبلغ الدرجة الكافية من السخونة للسطوع، فهي تبدأ باستخدام تفاعل بروتون-بروتون المتسلسل. في البداية، يندمج اثنان من البروتونات معًا لتكوين ثنائي البروتون (هو شكل خفيف من الهيليوم)، وفوتون واحد. بعد ذلك، يطلق أحد البروتونات في ثنائي البروتون، بوزيترون واحد ونيوترينو واحد ويصبح نيوترونًا، والآن يصير لدينا نواة ديوتيريوم. وبالرغم من أنَّ هذه الخطوة بطيئة نسبيًّا، فهي تصدر مقدارًا صغيرًا من الطاقة. يتصادم البوزيترون مع أحد الإلكترونات، ويفني أحدهما الآخر

لتشكيل اثنين من الفوتونات وقدرٍ أكبر قليلًا من الطاقة. بعد أربع ثوانٍ تقريبًا، تندمج نواة الديوتيريوم مع بروتون آخر لتشكيل نظير للهيليوم، هو الهيليوم-٣، ويصدر حينها مقدارٌ أكبر كثيرًا من الطاقة.

في هذه المرحلة، توجد ثلاثة خيارات. يؤدي الخيار الأساسي إلى اندماج اثنتين من أنوية الهيليوم-٣ لتشكيل هيليوم-٤ اعتيادي، إضافةً إلى نواتي هيدروجين مع مقدار أكبر وأكبر من الطاقة. تستخدم الشمس هذا المسار في ٨٦٪ من الوقت. يؤدي الخيار الثاني إلى تشكيل نواة البيريليوم، الذي يتحول إلى الليثيوم الذي يندمج مع الهيدروجين لتكوين الهيليوم. وتنطلق العديد من الجسيمات الأخرى أيضًا. تستخدم الشمس هذا المسار في ١٤٪ من الوقت. أما المسار الثالث، فهو يتضمن نواة البيريليوم والبورون، وتستخدمه الشمس في ٠,١١٪ من الوقت. يوجد خيار رابع من الناحية النظرية، وهو يتمثَّل في اندماج الهيليوم-٣ مع الهيدروجين لتكوين الهيليوم-٤ مباشرةً، لكنه نادر للغاية حتى إنه لم يُرصَد قط.

يمثل علماء الفيزياء الفلكية هذه التفاعلات من خلال معادلات على غرار:

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma + 5.49\mathrm{MeV}$$

حيث D = ديوتيريوم، وH = هيدروجين، وHe = هيليوم، ويمثِّل المؤشر العلوي عدد النيوترونات، بينما يمثل المؤشر السفلي عدد البروتونات، ويمثل γ فوتونًا، بينما MeV هي وحدة الطاقة (ميجا إلكترون فولت). لم أذكر هذا لأنني أريد منك متابعة العملية بالتفصيل؛ بل لأوضح أنه «يمكن» متابعتها بالتفصيل، وأنها تتخذ بنية رياضية محددة.

لقد ذكرتُ سابقًا النظرية القائلة بتطور النجوم؛ ومن ثمَّ تحرُّك توليفاتها المميِّزة من درجة الحرارة واللمعان على مخطط هرتزبرونج-راسل. تنطوي الفكرة على قدر من الصواب، لكنَّ تفاصيلها الأصلية كانت خاطئة، واتضح أيضًا أنَّ النجوم المختلفة تتبع مسارات مختلفة في الاتجاه المعاكس لذلك الذي كان يُعتقَد في بداية الأمر أنها تتبعه.[2] حين يأتي نجمٌ ما إلى الوجود، يتخذ مكانًا ما في النسق الأساسي في مخطط هرتزبرونج-راسل. يتوقف هذا الموقع على كتلة النجم التي تحدِّد لمعانه ودرجة حرارته. تتمثَّل القوى الأساسية التي تؤثر في ديناميكيات النجم في قوى الجاذبية التي تؤدي إلى انكماشه، وضغط الإشعاع الناتج عن اندماج الهيدروجين، والذي يؤدي إلى تمدُّده. ثمَّة دورة مستقرة من التغذية الراجعة تؤدي إلى عمل هاتين القوتين كلٍّ منهما ضد الأخرى

للوصول إلى حالة من التوازن. إذا بدأت الجاذبية في الفوز، فسينكمش النجم مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته وزيادة مستويات الإشعاع لاستعادة التوازن. وعلى العكس من ذلك، إذا بدأت مستويات الإشعاع في الفوز، فسيتمدد النجم وتقل درجة حرارته، وتعيده الجاذبية مرة أخرة إلى حالة التوازن.

يستمر فعل التوازن إلى أن يوشك الوقود على النفاد. يستغرق هذا الأمر مئات المليارات من الأعوام في حالة الأقزام الحمراء البطيئة الاحتراق، ويستغرق ١٠ مليارات عام تقريبًا لنجم مثل الشمس، وبضعة ملايين الأعوام تقريبًا لنجم ساخن ضخم من النوع O. في تلك المرحلة، تهيمن الجاذبية، وينكمش باطن النجم. وإما أن يصبح باطن النجم ساخنًا بالدرجة الكافية لبدء اندماج الهيليوم، أو أن يصبح مادة متحللة، وهي بمثابة شبكة ذرية معلقة، تمسك بالانهيار الجذبوي. تحدد كتلة النجم أيَّ الخيارين يحدث، وتوجد بضع حالات توضح هذا التنوع.

إذا كانت كتلة النجم عُشر حجم الشمس، فإنه يظل في النسق الأساسي لفترة تتراوح من ٦ إلى ١٢ تريليون عام، ثم يصبح قزمًا أبيض في نهاية المطاف.

وإذا كان النجم في حجم الشمس فإنه يكوِّن باطنًا من الهيليوم الخامل محاطًا بطبقة لاحتراق الهيدروجين. يؤدي هذا إلى تمدد النجم، ومع انخفاض درجة حرارة طبقاته الخارجية، يصبح عملاقًا أحمر. ينهار القلب إلى أن تصبح مادته متحللة. يطلق الانهيار مقدارًا من الطاقة يؤدي إلى زيادة درجة حرارة الطبقات المحيطة التي تبدأ في نقل الحرارة بالحمل بدلًا من إشعاعها فحسب. تصبح الغازات مضطربة وتتدفق من القلب باتجاه السطح، ثم تتدفق ثانية في طريق العودة. وبعد مليار عام تقريبًا، يصبح باطن الهيليوم المتحلل ساخنًا للغاية حتى إنَّ أنوية الهيليوم تندمج لتكوين الكربون، إضافةً إلى البيريليوم بصفته وسيطًا قصير الأجل. وفقًا لعوامل أخرى، يمكن للنجم أن يتطور حينها إلى عملاق مقارب. بعض النجوم من هذا النوع تتذبذب ويتناوب فيها التمدد والانكماش، وتتذبذب درجات الحرارة فيها أيضًا. وفي نهاية المطاف، يبرد النجم ويتحول إلى قزم أبيض.

لا يزال أمام الشمس ٥ مليارات عام تقريبًا قبل أن تصبح عملاقًا أحمر. في تلك المرحلة، ستبتلع الشمس عطارد والزهرة مع تمددها. وعند تلك النقطة، ستتحرك الأرض على الأرجح في مدار خارج سطح الشمس فحسب، لكنَّ القوى المدية والاحتكاك مع الغلاف اللوني ستبطئ من حركتها. وستُبتَلَع هي أيضًا في نهاية المطاف. لن يؤثر ذلك

على مستقبل الجنس البشري؛ إذ إنَّ متوسط حياة النوع لا يزيد عن بضعة ملايين الأعوام فحسب.

إذا كان النجم ضخمًا بالدرجة الكافية؛ أي أكبر كثيرًا من الشمس، فإنه يبدأ في دمج الهيليوم قبل أن يتحلل باطنه، وينفجر ليشكل مستعرًا أعظم. وإذا كانت كتلة النجم تزيد عن ٤٠ ضعفًا من كتلة الشمس، فإنه يدفع القدر الأكبر من مادته بعيدًا بفعل ضغط الإشعاع، ويظل ساخنًا للغاية، ويبدأ في سلسلة من المراحل يُستعاض فيها عن العنصر الأساسي في باطنه، بعنصر آخر أعلى منه درجة في الجدول الدوري. يصبح باطن النجم مقسَّمًا إلى طبقات متحدة المركز: الحديد، والسيليكون، والأكسجين، والنيون، والكربون، والهيليوم، والهيدروجين. يمكن أن ينتهي الأمر بأن يصبح باطن النجم قزمًا أبيض أو قزمًا أسود، وهو قزم أبيض فقد الكثير جدًّا من الطاقة حتى إنه يتوقف عن السطوع. أما إذا كان الباطن المتحلل ضخمًا بالدرجة الكافية فإنه قد يكوِّن نجمًا نيوترونيًّا، أو ثقبًا أسود في بعض الحالات النادرة (انظر الفصل الرابع عشر).

أؤكد مرةً أخرى أنَّ التفاصيل غير مهمة في هذا السياق، وقد عرضتُ شجرة معقَّدة من التواريخ التطورية المحتملة بتبسيط كبير. تحكم النماذج الرياضية التي يستخدمها علماء الفيزياء الفلكية نطاق الاحتمالات، وترتيب ظهورها، والظروف التي تؤدي إليها. فكل تلك المجموعة الثرية من النجوم التي تتنوع في أحجامها ودرجات حرارتها وألوانها، يجمع بينها أصل مشترك: الاندماج النووي الذي يبدأ من الهيدروجين، ويخضع لقوى ضغط الإشعاع والجاذبية المتنافسة.

ومن الخيوط الأساسية التي تمر في القصة بأكملها هو تحويل الاندماج لأنوية الهيدروجين البسيطة إلى أنوية أكثر تعقيدًا: الهيليوم والبيريليوم والليثيوم والبورون وغير ذلك.

ويقودنا هذا الخيط إلى سبب آخر لأهمية النجوم.

غنَّت جوني ميتشل: «نحن غبار النجوم». إنه قول شائع مبتذل، غير أنَّ الأقوال الشائعة غالبًا ما تكون صحيحة. وقد عبَّر آرثر إيدينجتون عن الأمر نفسه سابقًا في «نيويورك تايمز ماجازين»؛ إذ قال: «إننا أجزاء من مواد النجوم التي بردت مصادفةً، نحن أجزاء من النجوم اتخذت الاتجاه الخاطئ.» فلتحاول توفيق «ذلك» على الموسيقى.

وفقًا للانفجار العظيم، كانت «النواة» الوحيدة لعنصرٍ ما في بدايات الكون هي نواة الهيدروجين. وفي فترة تتراوح بين ١٠ ثوانٍ و٢٠ دقيقة بعد ظهور الكون، وباستخدام

تفاعلات كتلك التي وصفناها للتو، شكَّل التخليق النووي في الانفجار العظيم الهيليوم-٤، إضافةً إلى كميات ضئيلة من الديوتيريوم، والهيليوم-٣، والليثيوم ٧. ظهر التريتيوم الإشعاعي القصير الأجل أيضًا، وكذلك البيريليوم-٧، لكنهما سرعان ما اضمحلا.

كان الهيدروجين وحده كافيًا لتشكيل الغيوم الغازية التي انهارت لتكوين النجوم البدائية، ومن ثمَّ النجوم. وُلِدت المزيد من العناصر في الاضطرابات النووية العظيمة بداخل النجوم. في عام ١٩٢٠، اقترح إيدينجتون أنَّ النجوم تستمد طاقتها من اندماج الهيدروجين إلى الهيليوم. وفي عام ١٩٣٩، درس هانز بيته تفاعل بروتون-بروتون المتسلسل وغيره من التفاعلات النووية التي تجري في النجوم، فمنح نظرية إيدينجتون مزيدًا من التفاصيل. وفي أربعينيات القرن العشرين، جادل جورج جاموف بأنَّ جميع العناصر بأكملها تقريبًا قد تشكَّلت أثناء الانفجار العظيم.

في عام ١٩٤٦، اقترح فريد هويل أنَّ مصدر كلِّ ما هو أكبر من الهيدروجين ليس الانفجار العظيم في حد ذاته؛ بل التفاعلات النووية اللاحقة بداخل النجوم. وقد نشر تحليلًا طويلًا لمسارات التفاعل المؤدية إلى جميع العناصر وصولًا إلى الحديد.[3] كلما زاد قِدم المجرة، زاد ثراء مزيجها من العناصر. وفي عام ١٩٥٧، نشر كلٌّ من مارجريت وجيفري بوربيدج، وويليام فاولر، وهويل، ورقةً بعنوان «تركيب العناصر في النجوم».[4] وقد أرست هذه الورقة الشهيرة التي عادةً ما يُشار إليها بورقة B^2FH، نظرية التخليق النووي النجمي، وهو مصطلح راقٍ يعبِّر عن العنوان ليس إلا، وذلك من خلال تصنيف الكثير من العمليات الأكثر أهمية في التفاعل النووي. وبعد ذلك بفترة قصيرة، توصَّل علماء الفيزياء الفلكية إلى تفسيرٍ مقنع يتنبأ بنسب العناصر في المجرة ويتفق (في معظمه) مع ما نرصده.

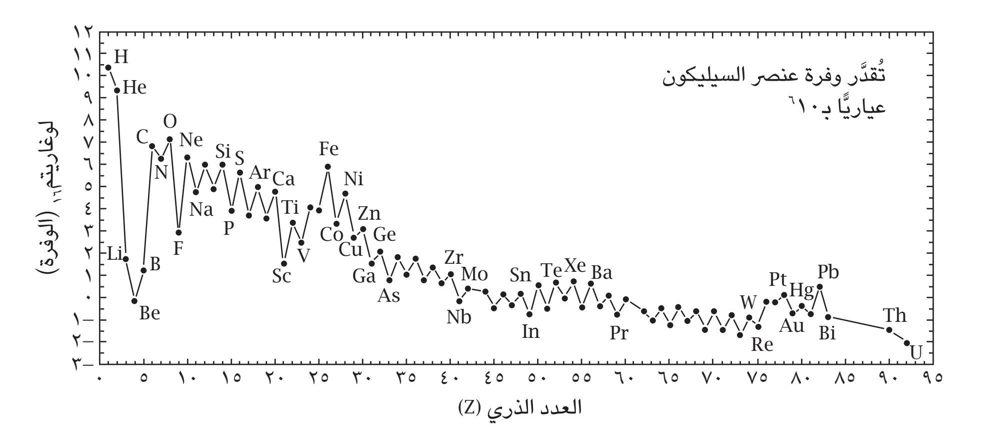
توقَّفت القصة في ذلك الوقت عند نواة الحديد؛ لأنها أضخم نواة يمكن أن تنتج من عملية احتراق السيليكون، وهي سلسلة من التفاعلات التي تبدأ بالسيليكون. يؤدي الاندماج المتكرر مع الهيليوم إلى إنتاج الكالسيوم، ثم يؤدي بعد ذلك من خلال سلسلة من نظائر التيتانيوم غير المستقرة، إلى إنتاج الكروم والحديد والنيكل. يشكِّل النظير، نيكل-٥٦، حاجزًا يعوق المزيد من التقدم؛ إذ إنَّ حدوث خطوة أخرى من اندماج الهيليوم سيستهلك الطاقة بدلًا من إنتاجها. ينحل نظير النيكل إلى النظير المشع كوبلت -٥٦، الذي يتحول إلى النظير المستقر، حديد-٥٦.

لإنتاج عناصر أكبر من الحديد، كان على الكون أن يخترع خدعة جديدة.

المستعرات العظمى.

يُعرَّف المستعر الأعظم بأنه نجم منفجر. وثمَّة شكل أقل نشاطًا يُعرف باسم المستعر سيحيد بنا عن الموضوع. رأى كيبلر أحد المستعرات عام ١٦٠٤، وهو آخر مستعر قد لوحظ حدوثه في المجرة، بالرغم من العثور على بقايا لاثنين آخرين أحدث منه. يُعد المستعر الأعظم في جوهره نسخة عنيفة من انفجار قنبلة نووية، وحين يحدث هذا يغمر النجم المجرة بضيائه. يصدر عن هذا الانفجار قدرٌ هائل من الإشعاع يساوي ما تصدره الشمس على مدار حياتها. ثمَّة سببان لهذا. يمكن لقزمٍ أبيض أن يكتسب قدرًا إضافيًّا من المادة من خلال ابتلاع نجم قرين، مما يزيد من درجة حرارته وينشِّط اندماج الكربون، «يستمر» هذا الاندماج دون رقابة فينفجر النجم. أما السبب الآخر، فهو أن ينهار باطن نجم ضخم للغاية، وتحفِّز الطاقة الصادرة مثل ذلك الانفجار.

في كلتا الحالتين، يتمزق النجم إلى أجزاء في مِعشار سرعة الضوء، مما يشكل موجة صدمية. يؤدي هذا إلى جمع الغاز والغبار؛ فيتكون غلاف نامٍ، تلك هي بقايا المستعر الأعظم. وتلك هي الطريقة التي تكوَّنت بها عناصر الجدول الدوري الأكبر من الحديد، وانتشرت على مسافات تمتد عبر المجرات.



الوفرة المقدَّرة للعناصر الكيميائية في النظام الشمسي. المقياس الرأسي لوغاريتمي؛ لذا فإنَّ التقلبات أكبر كثيرًا مما تبدو عليه.

لقد ذكرتُ أنَّ نِسب العناصر التي تتنبأ بها النظرية تتطابق «في معظمها» مع الملاحظات. ثمَّة استثناء بارز هو الليثيوم: فالكمية الفعلية من ليثيوم-٧ لا تزيد عن ثُلث

ما تتنبأ به النظرية، بينما يوجد آلاف الأضعاف الإضافية من ليثيوم-٦. يعتقد بعض العلماء أنَّ ذلك خطأ طفيف يمكن إصلاحه على الأرجح من خلال إيجاد مسارات جديدة أو تصورات جديدة لتشكُّل الليثيوم. ويعتقد علماء آخرون أنها مشكلة خطيرة قد تستلزم نظريات فيزيائية جديدة تتجاوز حدود الانفجار العظيم.

ثمَّة احتمال ثالث يتمثَّل في وجود المزيد من ليثيوم-٧ حيث لا نستطيع الكشف عنه. في عام ٢٠٠٦، ذكر أندرياس كورن وزملاء له أنَّ مقدار ليثيوم-٧ الموجود في التجمع النجمي الكروي «إن جي سي ٦٣٩٧»، الذي يقع في المنطقة العامة من سحابة ماجلان الكبرى، يطابق ما تتنبأ به نظرية التخلق النووي في الانفجار العظيم.[5] وهم يقترحون أنَّ النقص الواضح لليثيوم-٧ في نجوم هالة المجرة؛ إذ يبلغ ربع مقدار التنبؤ تقريبًا، ربما يكون علامة على أنَّ هذه النجوم قد فقدت الليثيوم-٧ على ما يبدو لأنَّ الحمل العنيف نقله إلى الطبقات الأعمق، حيث لا يعود من الممكن الكشف عنه.

إنَّ هذه الاستجابة بشأن تباين الليثيوم تثير مشكلةً محتملة مع تنبؤات نظرية التخليق النووي في الانفجار العظيم. لنفترض أنك تحسب وفرة العديد من العناصر. من المرجح أنَّ التفاعلات النووية الأكثر شيوعًا تفسِّر ما حدث بالفعل، مما يؤدي إلى قيم لا تختلف كثيرًا عن الواقع في معظم الأحيان. والآن، تبدأ بالعمل على أوجه التباين. القليل جدًّا من الكبريت؟ حسنًا، فلنكتشف مسارات جديدة للكبريت. حين نفعل ذلك، وتبدو الأعداد مواتية وأننا قد حللنا أمر الكبريت، ننتقل إلى الزنك. غير أننا لا نستمر في البحث عن مسارات جديدة للكبريت. لست أعني أنَّ أحدًا يفعل ذلك الأمر عمدًا، لكنَّ حوادث التسجيل الانتقائي من هذا النوع معتادة جدًّا، وقد حدثت في مجالات أخرى في العلوم. ربما لا يكون الليثيوم هو المثال الوحيد على التباين. وعند التركيز على الحالات التي تكون فيها النسب ضئيلة للغاية، قد نغفل بعض الحالات التي يمكن أن تكون النسب فيها كبيرة للغاية من خلال إجراء عملية حسابية موسعة.

من السمات الأخرى للنجوم التي تعتمد اعتمادًا كبيرًا على النماذج الرياضية، بنيتها التفصيلية. يمكن وصف غالبية النجوم في مرحلة محددة من تطورها بأنها مجموعة من الأغلفة متحدة المركز. لكل غلاف منها تركيبه المميز، وهو «يحترق» بالتفاعلات النووية الملائمة. بعض الأغلفة يستقبل الإشعاع الكهرومغناطيسي، وتشع الحرارة إلى الخارج. وبعضها الآخر لا يفعل ذلك، وتُنقَل الحرارة فيه من خلال الحَمل. ترتبط هذه الاعتبارات البنيوية ارتباطًا وثيقًا بتطور النجوم والكيفية التي تُخلَّق بها العناصر الكيميائية.

من خلال تحديد أنَّ إحدى النسب صغيرة للغاية، توصَّل هويل إلى تنبؤ شهير. ذلك أنه حين أجرى حسابات وفرة الكربون، جاءت النتيجة بعدم وجود ما يكفي منه. بالرغم من ذلك، فقد ظهرنا «نحن» إلى الوجود بينما يمثل الكربون مكوِّنًا ضروريًّا لنا. ولأننا من غبار النجوم، فلا بد أنها تصنع من الكربون كمياتٍ أكبر كثيرًا من تلك التي أشارت إليها حسابات هويل. ولهذا؛ فقد تنبأ بوجود رنين في نواة الكربون لم يكن معروفًا قبل ذلك الوقت، وكان هذا الرنين سيجعل تكوين الكربون أسهل كثيرًا.[6] رُصِد هذا الرنين لاحقًا حيث تنبأ به هويل تقريبًا. وكثيرًا ما يُقدم هذا التنبؤ باعتباره انتصارًا لمبدأ وجود الإنسان المتمثل في أنَّ وجودنا يفرض قيودًا على الكون.

ثمَّة تحليل نقدي لهذه القصة في مكانٍ ما بالفيزياء النووية. فالمسار المعتاد للكربون هو تفاعل ألفا الثلاثي الذي يحدث في نجم عملاق أحمر. يحتوي الهيليوم-٤ على اثنين من البروتونات واثنين من النيوترونات. ويحتوي النظير الأساسي للكربون على ستة من كلٍّ منهما. إذن، يمكن لثلاثة من أنوية الهيليوم (ثلاثة من جسيمات ألفا) أن تندمج معًا لتكوين الكربون. عظيم، لكنَّ نواتَين من الهيليوم تتصادمان في العادة، وإذا أردنا تكوين الكربون؛ فلا بد أن تصطدم الثالثة بهما حين تفعلان ذلك. غير أنَّ التصادم الثلاثي في النجوم شديد الندرة؛ ومن ثمَّ فلا يمكن للكربون أن ينشأ من هذا المسار. بدلًا من ذلك، تندمج اثنتان من أنوية الهيليوم معًا لتكوين بيريليوم-٨، ثم تندمج نواة هيليوم ثالثة مع الناتج لتكوين الكربون. من سوء الحظ أنَّ بيريليوم-٨ يتحلل بعد $١٠^{-١٦}$ من الثانية مما يمنح نواة الهيليوم هدفًا صغيرًا للغاية. إنَّ هذه الطريقة التي تنقسم إلى خطوتَين لا يمكن أن تنتج ما يكفي من الكربون.

هذا ما لم تكن طاقة الكربون قريبة للغاية من طاقة البيريليوم-٨ والهيليوم مجتمعتَين. يمثل هذا رنينًا نوويًّا، وقد قاد هويل إلى التنبؤ بحالةٍ من حالات الكربون لم تكن معروفة آنذاك، وهي تحدث عندما تساوي الطاقة ٧٫٦ ميجا إلكترون فولت؛ أي أعلى من أكثر حالات الطاقة انخفاضًا. بعد ذلك ببضع سنوات، اكتُشِفت حالة أخرى عند طاقة تبلغ ٧٫٦٥٤٩ ميجا إلكترون فولت. غير أنَّ مجموع طاقة البيريليوم-٨ والهيليوم يساوي ٧٫٣٦٦٧ ميجا إلكترون فولت؛ ومن ثمَّ فإنَّ حالة الكربون حديثة الاكتشاف تتضمن طاقة أعلى بعض الشيء.

فمن أين تأتي هذه الطاقة؟ إنها تساوي كمية الطاقة نفسها تقريبًا التي توفرها درجة حرارة عملاق أحمر.

يُعد هذا المثال من الأمثلة المفضلة لدى أنصار «الضبط الدقيق»، وهي الفكرة القائلة بأنَّ الكون مضبوط على نحو بالغ الدقة ليسمح بوجود الحياة. وسأعود إلى هذا لاحقًا في الفصل التاسع عشر. تتمثَّل فكرة أنصار هذا المبدأ في أننا لم نكن لنوجد هنا من دون الكربون. غير أنَّ هذا القدر من الكربون يستلزم الضبطَ الدقيق لأحد النجوم ورنينًا نوويًّا، وهذان يعتمدان على قواعد الفيزياء الأساسية. وقد وسَّع هويل هذه الفكرة لاحقًا:[7]

> لا بد أنَّ عقلًا يتمتع بقدرات حسابية فائقة قد صمَّم خواص ذرة الكربون، وإلا فستكون احتمالية إيجاد مثل هذه الذرة عبر قوى الطبيعة العمياء ضئيلة للغاية. ويشير التأويل المنطقي للحقائق إلى أنَّ عقلًا فائقًا قد تلاعب بالفيزياء والكيمياء والأحياء أيضًا، وأنه ما من قوى عمياء في الطبيعة تستحق الذكر.

يبدو الأمر لافتًا، ولا يمكن أن يكون مصادفة بالطبع. وهو ليس كذلك بالفعل. غير أنَّ السبب يكشف زيف الضبط الدقيق. فلكل نجم ضابط حراري خاص به يتمثَّل في حلقة تغذية راجعة سلبية حيث يعدِّل كلٌّ من درجة الحرارة والتفاعل من أحدهما الآخر كي يتلاءما. وهذا الرنين «المضبوط بدقة» في تفاعل ألفا الثلاثي، ليس بأكثر روعة من نيران حارقة للفحم في درجة الحرارة الملائمة لذلك تمامًا. وهذا هو ما تفعله حرائق الفحم. الحق أنه ليس أكثر روعة من كون أرجلنا بالطول المناسب لبلوغ الأرض. فتلك حلقة تغذية راجعة أيضًا: العضلات والجاذبية.

لقد كان تصرفًا سيئًا من هويل بعض الشيء أن يصوغ تنبؤه في سياق الوجود البشري. فالنقطة الفعلية هي أنَّ «الكون» يحتوي على قدر ضئيل للغاية من الكربون. لا يزال من المدهش بالطبع أنَّ العمالقة الحمراء والأنوية الذرية توجد على الإطلاق، وأنها تصنع الكربون من الهيدروجين، وأنَّ بعض الكربون يدخل في تركيبنا في نهاية المطاف. غير أنَّ هاتين قضيتان مختلفتان تمامًا. فالكون بالغ التعقيد والثراء، وجميع أنواع الأمور الرائعة تحدث فيه. ومع ذلك، لا ينبغي أن نخلط بين النتائج والأسباب، ونتخيل أنَّ الغرض من الكون هو صناعة البشر.

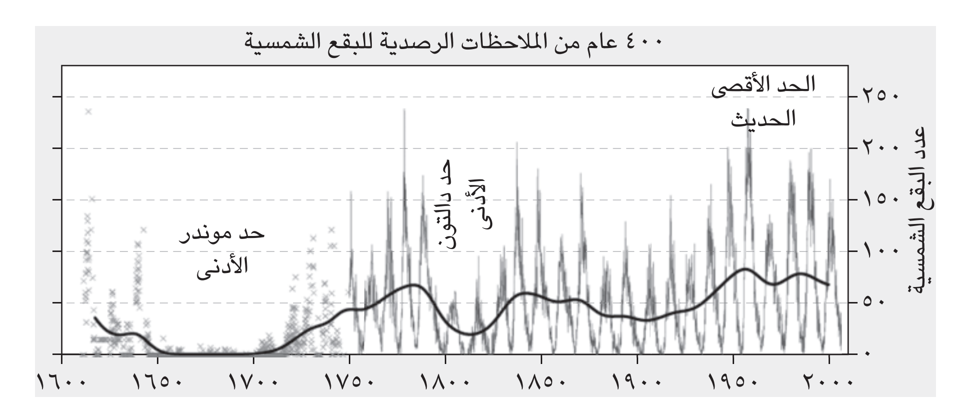
من الأسباب التي دعتني إلى ذكر ذلك (بخلاف كرهي لادعاءات الضبط الدقيق المبالَغ فيها) هي أنَّ القصة كلها قد صارت غير ذات صلة بعد اكتشاف طريقة جديدة تصنع النجوم بها الكربون. ففي عام ٢٠٠١، اكتشف إريك فايجلسن وزملاء له ٣١ من النجوم الحديثة السن في سديم الجبار. جميع هذه النجوم في حجم الشمس تقريبًا، لكنها بالغة النشاط حتى إنَّ وهج الأشعة السينية الذي تطلقه أقوى من الوهج الشمسي اليوم بمائة

ضعف، وهي تطلقه بتتابع يزيد مائة ضعف أيضًا. وتكفي طاقة البروتونات الموجودة في هذه التوهجات لتشكيل جميع أنواع العناصر الثقيلة في قرص من الغبار حول النجم. إذن، فلا حاجة لوجود مستعر أعظم للحصول عليها. ويشير هذا إلى أننا نحتاج إلى مراجعة الحسابات المتعلقة بنشأة العناصر الكيميائية بما فيها الكربون. فربما تكون النتائج التي تبدو مستحيلة نابعة من فقر الخيال البشري فحسب. وربما تتغير النسب التي تبدو صحيحة إذا منحناها المزيد من التفكير.

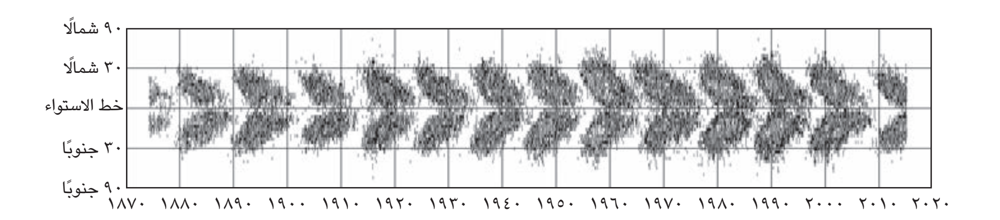
كان فلاسفة اليونان يرون أنَّ الشمس تجسيد مثالي للهندسة السماوية، كرة لا تشوبها شائبة. غير أنَّ الفلكيين الصينيين القدماء حين رأوها عبر الضباب، رأوا أنها مرقَّطة. لاحظ كيبلر بقعة على الشمس عام ١٦٠٧، لكنه ظنَّ أنها المريخ في مروره بالشمس. وفي عام ١٦١١، نشر يوهانس فابريتسيوس «تعليق على البقع المرصودة على الشمس، ودورانها الواضح مع الشمس» الذي يفصح عنوانه عن فحواه. وفي عام ١٦١٢، رصد جاليليو بقعًا داكنة على الشمس، وسجَّلها في رسومات توضح أنَّها تتحرك، مما يؤكد زعم فابريتسيوس بدوران الشمس. إنَّ وجود البقعة الشمسية قد هدم الاعتقاد الراسخ بمثالية الشمس، وأشعل نزاعًا ساخنًا على الأسبقية.

يختلف عدد البقع الشمسية من عام إلى عام، لكنها تتسم بنمط منتظم نسبيًّا يتمثَّل في دورة تمتد على مدار ١١ عامًا، وهي تبدأ بعدم وجود بقع تقريبًا، إلى مائة بقعة أو أكثر في العام. شهد هذا النمط خللًا في الفترة من ١٦٤٥ إلى ١٧١٥؛ إذ لم يُرَ سوى عدد قليل للغاية من البقع. تُعرف هذه الفترة باسم «حد موندر الأدنى».

ربما يوجد رابط بين البقع الشمسية والمناخ، لكنه سيكون ضعيفًا على الأرجح إن وجِد. لقد تزامن الحد الأدنى لموندر مع العصر الجليدي الصغير، وهو فترة طويلة من درجات الحرارة المنخفضة للغاية في أوروبا. وحدث الأمر نفسه مع فترة سابقة من النشاط المنخفض للبقع الشمسية، تُعرف باسم «حد دالتون الأدنى» (١٧٩٠–١٨٣٠)، وهي التي شهدت العام الشهير ١٨١٦ «عام بدون صيف»، لكنَّ انخفاض درجات الحرارة في ذلك العام نتج عن انفجار بركاني ضخم لبركان تمبورا في سومباوا بإندونيسيا. ربما يكون العصر الجليدي الصغير قد نتج هو أيضًا عن ارتفاع مستويات النشاط البركاني، وإن كان ذلك جزئيًّا على الأقل.[8] يرتبط «حد سبورر الأدنى» (١٤٦٠–١٥٥٠) بفترة برودة أخرى يأتي الدليل عليها من نسبة النظير كربون-١٤ في حلقات الأشجار، والتي ترتبط بالنشاط الشمسي. ذلك أنَّ سجلات البقع الشمسية لم تكن تُحفَظ في ذلك الوقت.



التغير في أعداد البقع الشمسية.



تخطيط البقع الشمسية وفقًا لدوائر العرض.

إنَّ رسم خطوط العرض للبقع الشمسية إضافةً إلى أعدادها يوضِّحان نمطًا مثيرًا للاهتمام يشبه سلسلة من الفراشات. تبدأ الدورة بوجود البقع بالقرب من القطب، ثم تظهر تدريجيًّا بالقرب من خط الاستواء مع اقتراب الأعداد من الحد الأقصى. في عام ١٩٠٨، أخذ جورج هيل الخطوة الأولى نحو فهم سلوكها حين ربط البقع الشمسية بالمجال المغناطيسي للشمس، وهو فائق القوة. وصمَّم هوريس بابكوك نماذج لديناميكيات المجال المغناطيسي للشمس في طبقاته الخارجية، وربط بين دورة البقع الشمسية وبين الانعكاسات الدورية للمولِّد الشمسي.[9] وفقًا لنظريته، تستغرق الدورة الكاملة ٢٢ عامًا، مع انعكاس شمالي/جنوبي للمجال يفصل بين النصفين.

تبدو البقعة الشمسية داكنة مقارنةً بمحيطها فحسب؛ إذ تبلغ درجة حرارة البقعة الشمسية ٤٠٠٠ درجة كلفن، بينما تبلغ درجة الغازات من حولها ٥٨٠٠ درجة

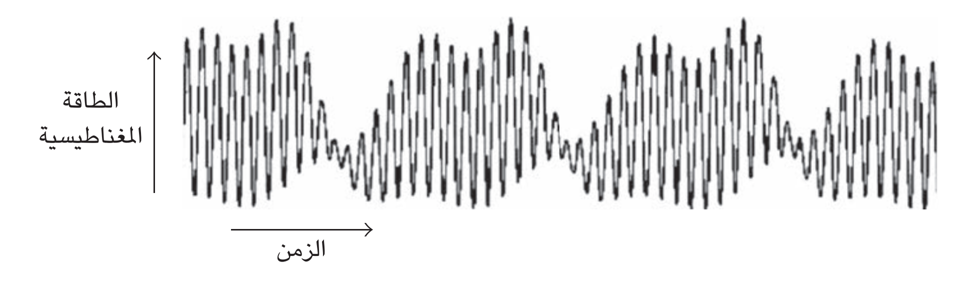
كلفن. إنها تشبه عواصف مغناطيسية في البلازما الشمسية الفائقة السخونة. تخضع قواعدها الرياضية للديناميكا المغناطيسية، وهو علم دراسة البلازما المغناطيسية الذي يتسم بالتعقيد الشديد. تبدو البقع الشمسية على أنها الأطراف العليا لأنابيب الفيض المغناطيسي، والتي تنشأ في أعماق الشمس.

عادةً ما يكون المجال المغناطيسي للشمس ثنائي القطبين كقضيب من المغناطيس له قطب شمالي وآخر جنوبي، بينما تتدفق خطوط المجال من أحدهما إلى الآخر. يقع القطبان بمحاذاة محور الدوران، وفي أثناء الدورة المعتادة للبقع الشمسية، تتجه الأقطاب إلى الاتجاه المعاكس كل ١١ عامًا. إذن، فالقطب المغناطيسي الذي يقع في «النصف الشمالي» من الشمس، يكون هو القطب المغناطيسي الشمالي أحيانًا، ويكون جنوبيًّا في أحيان أخرى. عادةً ما تظهر البقع الشمسية في صورة أزواج يتصل أحدها بالآخر، مع وجود مجال يشبه قضيبًا مغناطيسيًّا يتخذ اتجاه الشرق-الغرب. تتخذ البقعة التي تظهر أولًا اتجاه القطبية الذي يتخذه أقرب قطبي المجال المغناطيسي الأساسي، بينما تتخذ البقعة الثانية التي تتذيل في الخلف، اتجاه القطبية المعاكس.

ينتج المولِّد الشمسي الذي يدفع مجالها المغناطيسي بسبب الأعاصير الحملية التي تحدث في أبعد ٢٠٠ ألف كيلومتر من الشمس إلى الخارج، وذلك بالتزامن مع كيفية دوران النجم: أسرع عند خط الاستواء منه عند القطبين. تكون المجالات المغناطيسية في البلازما «محصورة»، وغالبًا ما تتحرك معها؛ ومن ثمَّ فإنَّ المواقع الابتدائية لخطوط المجال، والتي تلتف بين القطبين بزوايا قائمة على خط الاستواء، تبدأ في الاستقرار؛ إذ تسحبها المنطقة الاستوائية أمام الخطوط القطبية. يؤدي هذا إلى التواء خطوط المجال من خلال ضفر مجالات متضادة في قطبيتها. ومع دوران الشمس، تصبح خطوط المجال مشدودة للغاية، وحين يصل الإجهاد إلى القيمة الحرجة، تتجعَّد الأنابيب وتصطدم بالسطح. تتمدد خطوط المجال، وتنجرف البقع الشمسية المرتبطة بها نحو القطب. تصل البقعة المتذيلة إلى القطب أولًا، ولأنها تتخذ القطبية المعاكسة، تتسبب بمساعدة العديد من الأحداث المشابهة، في تغيير اتجاه المجال المغناطيسي للشمس. وتتكرَّر الدورة بمجال معكوس.

تتمثَّل إحدى النظريات التي تفسِّر حد موندر الأدنى في أنَّ مجال الشمس ثنائي القطبين، يُستكمَل بمجال رباعي الأقطاب، كقضيبين مغناطيسيين موضوعين جنبًا إلى جنب.[10] وإذا اختلفت فترة انعكاس المجال الرباعي الأقطاب عن المجال الثنائي القطب بدرجة طفيفة، فإنهما «يخفقان» معًا كنغمتين موسيقيتين متشابهتين لكنهما غير

متطابقتين. ينتج عن ذلك فترة طويلة من التذبذب في متوسط حجم المجال خلال دورةٍ ما، وحين يخفت هذا التذبذب تظهر بضع من البقع الشمسية في أي مكان. إضافةً إلى ذلك يكون المجال الرباعي الأقطاب متضاد القطبية في نصفي الشمس؛ مما يعزِّز المجال الثنائي القطب في أحد النصفين بينما يلغيه في النصف الآخر. ومن ثمَّ فإنَّ البقع التي تظهر بالفعل تنشأ كلها في نصف الكرة الشمسية نفسه، وهو ما حدث في حد موندر الأدنى. ثمَّة تأثيرات مشابهة قد رُصِدت على نحوٍ غير مباشر في نجوم أخرى يمكن أن تظهر بها بقع شمسية.



مجال ثنائي القطب ومجال رباعي الأقطاب مجتمعان في نموذج بسيط للمولِّد الشمسي، وفيه تتذبذب الطاقة الإجمالية بينما تخفت السعة الموجية على نحوٍ متكرر ثم تزداد مجددًا.

يمكن لخطوط المجال التي تشق طريقها فوق طبقة الغلاف الضوئي أن تشكِّل شواظًا شمسيًّا، وهي عبارة عن حلقات ضخمة من الغاز الساخن. يمكن لهذه الحلقات أن تنفصل ثم تتصل من جديد، مما يسمح للبلازما وخطوط المجال المغناطيسي أن تهب بعيدًا مع الرياح الشمسية. يؤدي هذا إلى ظهور الوهج الشمسي الذي يمكن أن يتسبَّب في تعطيل الاتصالات وتدمير شبكات الطاقة الكهربية والأقمار الاصطناعية. وكثيرًا ما يُتبَع ذلك بانبعاثات الكتلة الإكليلية الشمسية؛ إذ تنطلق كميات ضخمة للغاية من المادة من الإكليل، وهو منطقة رقيقة خارج الغلاف الضوئي، ويُرى بالعين خلال الكسوف الشمسي.

ثمَّة سؤال أساسي هو: ما المسافة التي تبعدها عنا النجوم؟ والحق أنَّ السبب الوحيد الذي يمكِّننا من معرفة الإجابة بخصوص أي شيء يقع على مسافة تزيد على بضع عشرات من

السنين الضوئية؛ يعتمد أيضًا على الفيزياء الفلكية، وإن كانت الملاحظة الأساسية تجريبيَّة في بادئ الأمر. لقد وجدت هنريتا ليفيت شمعة قياسية، وجعلتها معيارًا للنجوم.

في القرن السادس قبل الميلاد، قدَّر الفيلسوف وعالم الرياضيات اليوناني، طاليس، ارتفاع أحد الأهرامات المصرية باستخدام الهندسة من خلال قياس ظل الهرم، وظله الخاص. كانت النسبة بين ارتفاع الهرم وطول ظله هي النسبة نفسها بين ارتفاع طاليس وطول ظله «الخاص». يمكن قياس ثلاثة من هذه الأطوال بسهولة؛ ومن ثمَّ يمكن معرفة الطول الرابع. لقد كانت طريقته المبتكرة مثالًا بسيطًا على ما نسميه اليوم بعلم حساب المثلثات. فهندسة المثلثات تربط بين زواياها وأضلاعها. طوَّر الفلكيون العرب هذه الفكرة لصنع الآلات، واستُخدِمَت مرةً أخرى على الأرض في إسبانيا في العصور الوسطى لمسح الأرض. فمن الصعب قياس المساحات؛ إذ كثيرًا ما توجد معوقات في الطريق، لكنَّ الزوايا يسهل قياسها. يمكنك استخدام عمود وخيط، أو مِهْداف تلسكوبي، وهو الأفضل، لقياس اتجاه جسم بعيد. تبدأ بقياس خطٍّ معروف للقاعدة بدقة كبيرة. بعد ذلك تقيس الزاويتَين بدايةً من أي الطرفين إلى نقطة أخرى وتحسب المسافتين إلى تلك النقطة. الآن صار لديك طولان آخران معروفان؛ ومن ثمَّ تستطيع تكرار هذه العملية؛ أي «تثليث» المساحة التي ترغب في تخطيطها، وتحسب جميع المسافات من خط القاعدة المقيس فحسب.

اشتهر إيراتوستينس باستخدام الهندسة لحساب حجم الأرض من خلال النظر في بئر. لقد قارن بين زاوية منتصف النهار في الإسكندرية وفي سين (أسوان حاليًّا)، وحسب المسافة بينهما من الوقت الذي تستغرقه الجِمال في السفر من إحداهما إلى الأخرى. وبمعرفة حجم الأرض، يمكنك رصد القمر من موقعَين مختلفَين واستنتاج المسافة إلى القمر. بعد ذلك، يمكنك استخدام هذا لمعرفة المسافة إلى الشمس.

كيف؟ قرابة العام ١٥٠ قبل الميلاد، أدرك هيبارخوس أنه حين يكون القمر في طور التربيع تحديدًا، يتعامد الخط الواصل من القمر إلى الشمس على الخط الواصل من الأرض إلى القمر. وعند قياس الزاوية التي تقع بين خط القاعدة هذا وبين الخط الواصل من الأرض إلى الشمس، تستطيع حساب المسافة التي تبعدها الشمس. وقد كان تقديره الذي بلغ ثلاثة ملايين كيلومتر صغيرًا للغاية، فالقيمة الصحيحة هي ١٥٠ مليون كيلومتر. كان تقديره خاطئًا لأنه اعتقد أنَّ الزاوية تبلغ ٨٧ درجة بينما هي قريبة للغاية من الزاوية القائمة في واقع الأمر. يمكنك الحصول على تقدير دقيق باستخدام معدات أفضل.

تنطوي هذه العملية التمهيدية على خطوة إضافية. يمكنك استخدام مدار الأرض بصفته خطَّ قاعدة لإيجاد المسافة إلى نجمٍ ما. فالأرض تكمل نصف دورة حول مدارها كل

ستة شهور. ويعرِّف علماء الفلك «اختلاف المنظر» لنجمٍ ما، بأنه نصف الزاوية التي تقع بين خطي رؤية النجم، عند رصده من طرفين متقابلين على مدار الأرض. تكون مسافة النجم متناسبة على نحوٍ تقريبي مع اختلاف المنظر، واختلاف منظر ثانية قوسية واحدة يساوي ٣,٢٦ سنوات ضوئية. وهذه الوحدة هي الفرسخ الفلكي («اختلاف المنظر» لثانية قوسية واحدة)، والعديد من علماء الفلك يفضلونها على السنين الضوئية لهذا السبب.

حاول جيمس برادلي قياس اختلاف منظر أحد النجوم عام ١٧٢٩، لكنَّ جهازه لم يكن دقيقًا بما يكفي. وفي عام ١٨٣٨، استخدم فريدريش بيسل أحد هيلومترات فراونهوفر، وهو تصميم جديد وحساس من التلسكوبات قد نُفِّذ بعد موت فراونهوفر لرصد النجم «٦١ سيجني». بلغ اختلاف المنظر الذي قاسه ٠,٧٧ ثانية قوسية، وهو ما يمكن تشبيهه بعرض كرة تنس تبعد ١٠ كيلومترات، وينتج عن ذلك مسافة ١١,٤ سنة ضوئية، وهي قيمة قريبة للغاية من القيمة الفعلية. إنَّ تلك المسافة تساوي ١٠٠ تريليون كيلومتر، مما يوضح مدى ضآلة عالمنا مقارنةً بالكون الذي يحيط به.

لم يكن تضاؤل البشرية قد انتهى بعد. فمعظم النجوم، حتى تلك الموجودة في مجرتنا، لا يبدو أنَّ منظر اختلافها قابل للقياس، مما يشير إلى أنها أبعد كثيرًا من النجم «٦١ سينجي». غير أنه حين لا يوجد اختلاف منظر يمكن الكشف عنه، ينهار التثليث. يمكن لمسابير الفضاء أن تمدنا بخط قاعدة أطول، لكنها تكون أطول بمقدار قيم أسية، وهو ما يلزم في حالة النجوم البعيدة والمجرات. كان على علماء الفلك أن يفكروا في شيء مختلف للغاية ليواصلوا الصعود على سلم المسافات الكونية.

عليك أن تستخدم ما هو ممكن. وإحدى السمات التي يمكن ملاحظتها على الفور في النجوم، هي سطوعها الظاهري. يتوقف هذا على عاملين؛ مقدار السطوع الفعلي للنجم، أي سطوعه ولمعانه الجوهري؛ والمسافة التي يبعدها عنا. فالسطوع شبيه بالجاذبية؛ يقل بمقدار التربيع العكسي للمسافة. إذا كان مقدار السطوع الجوهري لأحد النجوم مساويًا للسطوع الجوهري للنجم «٦١ سينجي»، وكان سطوعه الظاهري تُسع ذلك المقدار، فإنه يكون أبعد بمقدار ثلاثة أضعاف.

من سوء الحظ أنَّ السطوع الجوهري يتوقف على نوع النجم، وحجمه، والنوع المحدد للتفاعلات النووية التي تحدث بداخله. لكي تنجح طريقة السطوع الظاهري، نحتاج إلى «شمعة قياسية»، وهي نوع من النجوم يعرف العلماء مقدار سطوعها الجوهري، أو

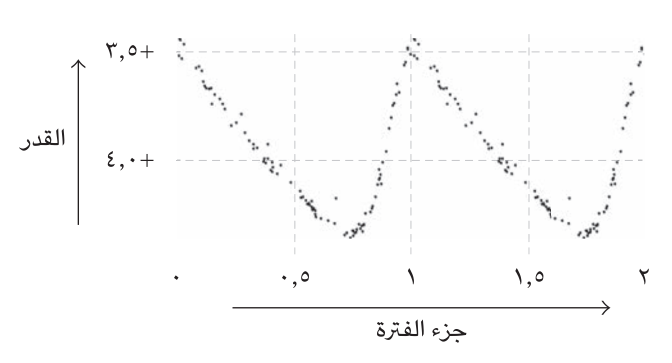
يمكنهم استنتاجه «بدون» معرفة المسافة التي يبعدها. وهنا تدخلت ليفيت. لقد وظَّفها بيكيرنج في عشرينيات القرن العشرين، لكي تعمل بمثابة «كمبيوتر» بشري يقوم بالمهمة الرتيبة المتمثلة في قياس لمعان النجوم الموجودة في الألواح الفوتوغرافية بمرصد كلية هارفارد، وتصنيفها.

تتسم معظم النجوم بالسطوع الظاهري نفسه طوال الوقت، لكنَّ بعضها متغير ويزيد سطوعه الظاهري أو ينقص في نمط دوري منتظم، مما يثير بالطبع اهتمامًا خاصًّا بها بين علماء الفلك. درست ليفيت هذه النجوم المتغيرة على نحوٍ خاص. يوجد سببان أساسيان لتغيرها. فالعديد من هذه النجوم من الأنظمة الثنائية؛ أي نجمين يدوران حول مركز كتلة مشترك. وإذا حدث وكانت الأرض تقع في مستوى هذين المدارين، فإنَّ النجمَين يمرَّان أمام أحدهما الآخر على فتراتٍ منتظمة. وحين يحدث ذلك، «تكون» النتيجة شبيهةً بالكسوف بالطبع؛ إذ يوجد أحد النجمين في طريق الآخر ويحجب الضوء الصادر منه مؤقتًا. إنَّ هذه «الأنظمة الثنائية الكاسفة» من النجوم المتغيرة، يمكن تمييزها من خلال كيفية تغيُّر السطوع المرصود: ومضات قصيرة الأجل على خلفية ثابتة. إنها شموع معيارية عديمة الجدوى.

بالرغم من ذلك، يوجد نوع آخر من النجوم المتغيرة يبشِّر بفائدة أكبر، وهي المتغيرات الداخلية. تلك هي النجوم التي يتقلب خرج طاقة التفاعلات النووية التي تحدث بداخلها بصفة دورية، ويتكرر النمط نفسه من التغيرات مرارًا وتكرارًا. يتقلب الضوء الذي تصدره أيضًا. ويمكن تمييز المتغيرات الداخلية أيضًا لأنَّ ما يحدث بها من تغيرات في الضوء «ليس» ومضات فجائية.

كانت ليفيت تدرس نوعًا معينًا من النجوم المتغيرة يُسمى نجم «سِيفيد» (قيفاوي)؛ لأنَّ أول نجم قد اكتُشِف من هذا النوع هو النجم «دلتا سيفي». وباستخدام طريقة إحصائية مبتكرة، اكتشفت ليفيت أنَّ النجوم القيفاوية الأكثر خفوتًا تتسم بفترات أطول، وفقًا لقاعدة رياضية معينة. بعض النجوم القيفاوية قريب بما يكفي للسماح بقياس اختلاف المنظر؛ ومن ثمَّ فقد استطاعت حساب المسافة التي تبعدها. وبناءً على هذا، استطاعت حساب سطوعها الجوهري. عُمِّمَت تلك النتائج بعد ذلك على جميع النجوم القيفاوية باستخدام الصيغة التي تربط بين الفترة والسطوع الجوهري.

كانت النجوم القيفاوية هي الشموع المعيارية التي طال البحث عنها. وقد أتاحت لنا، هي والأداة المعيارية المرتبطة بها؛ أي الصيغة التي تصف تغير السطوع الظاهري للنجم



منحنى الضوء المرصود للنجم «دلتا سيفي».

مع المسافة، أن نصعد خطوة أخرى على سلَّم المسافة الكونية. تضمنت كل خطوة من هذه الخطوات مزيجًا من الملاحظات والنظريات والاستدلال الرياضي: الأعداد والهندسة والإحصائيات والبصريات والفيزياء الفلكية. غير أنَّ الخطوة الأخيرة، وهي خطوة عملاقة للغاية، لم تكن قد أتت بعدُ.

الفصل الثاني عشر

نهر السماء العظيم

«انظر إلى تلك المجرة،
التي يسميها البشر بالطريق اللبني،
لأنها بيضاء.»

جيفري تشوسر، قصيدة «بيت الشهرة»

في العصور القديمة، لم تكن توجد في الشوارع إضاءة سوى شعلة من النيران بين الحين والآخر، وكان من المحال بالفعل ألا تلاحظ إحدى السمات الرائعة في السماء. أما اليوم، فالطريقة الوحيدة كي تراها هي أن تعيش في منطقةٍ لا يوجد بها سوى أقل القليل من الإضاءة الصناعية أو تزورها. إنَّ القدر الأكبر من سماء الليل منثور بنقاط لامعة من النجوم، لكنَّ ثمَّة شريطًا عريضًا غير منتظم من الضوء يمتد عبرها، وهو أشبه بنهر منه بمجموعة متناثرة من النقاط المضيئة. كان المصريون القدماء يعتقدون أنه نهر بالفعل، النظير السماوي للنيل. إننا لا نزال حتى اليوم ندعوه بالطريق اللبني، وهو اسم يعبِّر عن شكله المحيِّر. يطلق علماء الفلك على التركيب الكوني الذي يشكله اسم «مجرة»، وهي كلمة مشتقة من الاسمين اليونانيين القديمين: «لبني»، و«دائرة لبنية».

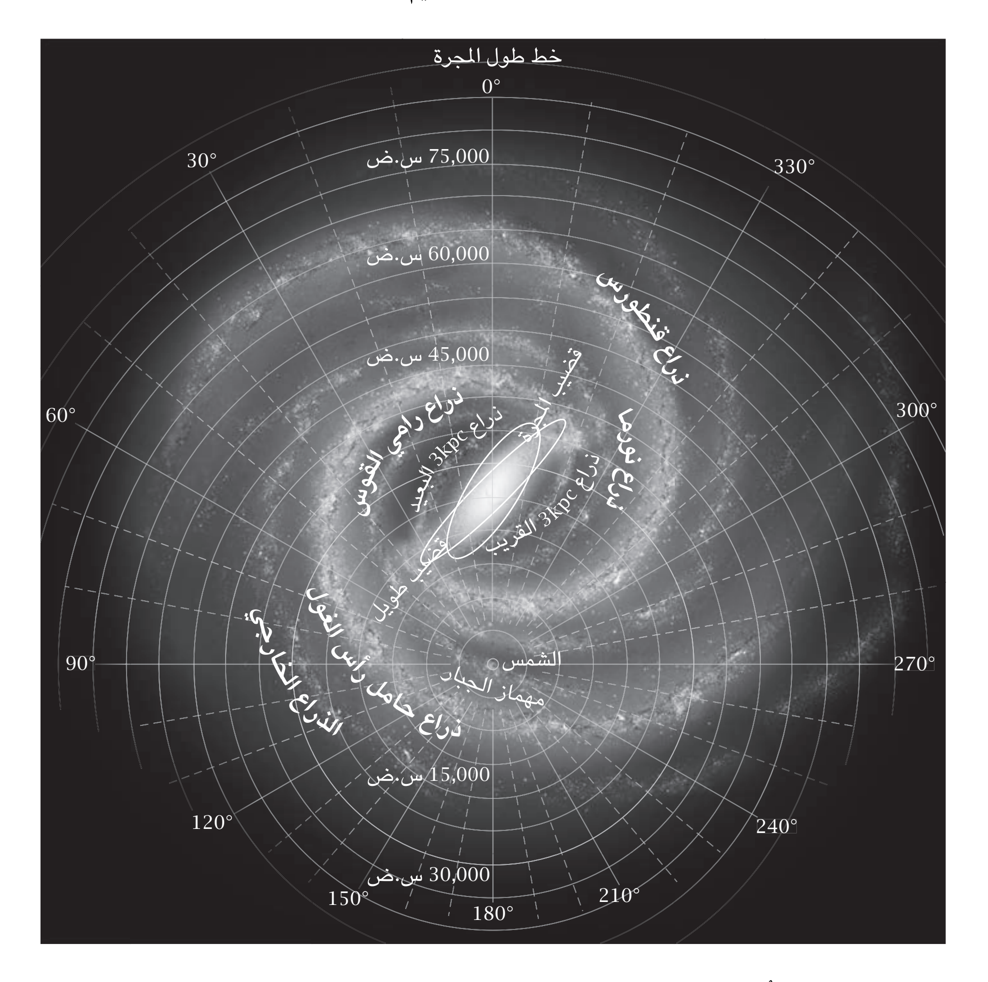
لقد استغرق الأمر ألف عام قبل أن يدرك الفلكيون أنَّ تلك المسحة اللبنية الممتدة عبر السماء هي، بالرغم مما تبدو عليه، شريط ضخم من النجوم، لكنه بعيد للغاية حتى إنَّ العين لا تراها على صورة نقاط منفصلة. وهذا الشريط في واقع الأمر هو قرص عدسي الشكل يُرى من الحافة، ونحن بداخله.



الطريق اللبني فوق بحيرةساميت، ويست فيرجينيا.



إحدى المجرات كما تُرى من الحافة، مع انتفاخ مركزي.



تصوُّر فني للشكل الذي تبدو عليه مجرة الطريق اللبني التي نوجد بها.

عندما بدأ الفلكيون في مسح السماء بتلسكوبات أقوى كثيرًا، لاحظوا وجود بقع أخرى خافتة تختلف في شكلها عن النجوم. بضعة منها يُرى بالعين الحادة النظر؛ فقد وصف الفلكي الفارسي الذي عاش في القرن العاشر الميلادي، عبد الرحمن الصوفي، مجرة «أندروميدا» بأنها غيمة صغيرة، وضمَّن سحابة ماجلان الكبرى في كتابه «النجوم الثابتة» عام ٩٦٤. في بداية الأمر، كان الفلكيون الغربيون يدعون هذه المسحات الخافتة المغبَّشة من الضوء باسم «السُّدُم».

غير أننا ندعوها الآن بالمجرات. ومجرتنا هي «المجرة». إنها التراكيب الضخمة الأكثر عددًا التي تُنظِّم النجوم. يتخذ العديد منها أنماطًا رائعة، أذرعًا حلزونية، لا تزال أصولها محل جدال حتى الآن. وبالرغم من الانتشار الواسع للمجرات، يوجد الكثير من سماتها التي لا نفهمها تمام الفهم.

في عام ١٧٤٤، جمع شارل مسييه أول فهرس منهجي للسُّدم. تضمنت نسخته الأولى ٤٥ جسمًا، وزاد هذا العدد في نسخة العام ١٧٨١ إلى ١٠٣. وبعد فترة قصيرة من النشر، اكتشف مسييه ومساعده بيير ميشان، سبعة أجسام أخرى. لاحظ مسييه وجود سديم بارز على نحوٍ مميز في كوكبة «أندروميدا». وهو يُعرف باسم السديم «إم ٣١»؛ لأنه أتى في المرتبة ٣١ على قائمته.

غير أنَّ التصنيف يختلف عن الفهم. فما هو السديم؟

منذ فترة مبكرة تصل إلى ٤٠٠ قبل الميلاد، اقترح الفيلسوف اليوناني ديموقريطوس أنَّ الطريق اللبني هو شريط من النجوم الضئيلة. وقد طوَّر أيضًا الفكرة القائلة بأنَّ المادة تتكوَّن من ذرات ضئيلة غير مرئية. نُسيت نظرية ديموقريطوس بشأن الطريق اللبني إلى حد كبير، حتى نشر توماس رايت كتابه «نظرية أصلية عن الكون أو فرضية جديدة»، وذلك في عام ١٧٥٠. أحيا رايت الاقتراح القائل بأنَّ «الطريق اللبني» قرص من النجوم لكنها أبعد كثيرًا من أن تُرى منفردة. وفكَّر أيضًا أنَّ السُّدم قد تكون مشابهة. في عام ١٧٥٥، غيَّر الفيلسوف إيمانويل كانط تسمية السُّدُم إلى «الجزر الكونية»؛ إذ كان يدرك أنَّ بقع الغيوم هذه تتكوَّن من عددٍ لا يُحصى من النجوم، أبعد كثيرًا من تلك الموجودة في «الطريق اللبني».

في الفترة ما بين ١٧٨٣ و١٨٠٢، وجد ويليام هيرشيل ٢٥٠٠ سديم آخر. وفي عام ١٨٤٥، استخدم اللورد روس تلسكوبه الجديد الفائق الضخامة، لتحديد نقاط منفردة من الضوء في بضعة من السدم، وهو أول دليل كان يمكن أن يؤكد صحة ما قاله كانط ورايت. غير أنَّ هذا الاقتراح كان خلافيًّا على نحوٍ مدهش. فالواقع أنَّ تحديدَ ما إذا كانت البقع الضوئية منفصلة عن «الطريق اللبني» بالفعل أم لا، أو ما إذا كان «الطريق اللبني» يشكل الكون بأكمله أم لا، قد ظل محلًّا للخلاف حتى عام ١٩٢٠، حين عقد هارلو شابلي وهيبر كورتيس «المناظرة الكبرى» في متحف سميثسونيان.

كان شابلي يرى أنَّ «الطريق اللبني» هو الكون بأكمله. وحاجج بأنه إذا كان السديم «إم ٣١» مثل «الطريق اللبني»، فلا بد أنه يقع على بُعد ١٠٠ مليون سنة ضوئية تقريبًا،

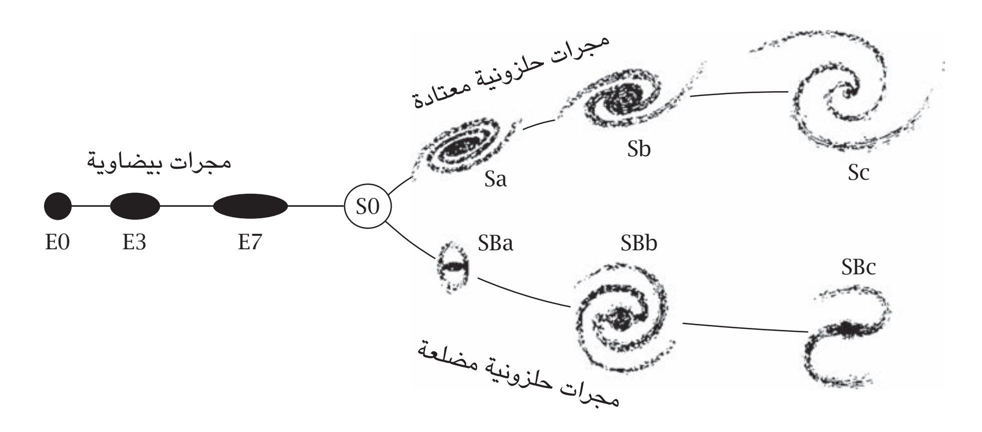
وهي مسافة أكبر كثيرًا من أن تُصدَّق. أيَّده في ذلك أدريان فون مانين بزعمه أنه قد رصد مجرة «دولاب الهواء» وهي تدور بالفعل. ولو كانت بعيدة بالدرجة التي تتنبأ بها نظرية كورتيس، لكان بعض أجزائها يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء. غير أنَّ مسمارًا آخر قد دُقَّ في التابوت، وهو رصد مستعر في سديم «إم ٣١»، وذلك نجم واحد منفجر قد أنتج من الضوء لفترة مؤقتة أكثرَ مما ينتجه سديم بأكمله. كان من الصعب رؤية نجم واحد يفوق سطوعه ملايين النجوم.

حسم هابِل المناظرة عام ١٩٢٤، بفضل شموع ليفيت المعيارية. في عام ١٩٢٤، استخدم تلسكوب هوكر، أقوى التلسكوبات الموجودة، لرصد النجوم القيفاوية في «إم ٣١». أخبرته العلاقة التي صاغتها ليفيت بين المسافة واللمعان، بأنها تقع على بُعد مليون سنة ضوئية. وقد وضع هذا «إم ٣١» في مكانٍ أبعد كثيرًا من حدود «الطريق اللبني». حاول شابلي وآخرون إقناعه بعدم نشر هذه النتيجة غير المنطقية، لكنَّ هابِل لم يستمع لهم ونشرها في صحيفة «نيويورك تايمز» أولًا، ثم في ورقة بحثية. اتضح بعد ذلك أنَّ فون مانين كان مخطئًا، وأنَّ المستعر الذي رصده شابلي كان مستعرًا أعظم في حقيقة الأمر، وقد أنتج من الضوء أكثر مما تنتجه المجرة التي كان يوجد بها.

اتضح من اكتشافات لاحقة أنَّ قصة النجوم القيفاوية أكثر تعقيدًا. فقد ميَّز فالتر بادي بين نوعين مختلفين من المتغيرات القيفاوية يتسم كلٌّ منهما بعلاقة مختلفة بين الفترة واللمعان، وهما المتغيرات القيفاوية الكلاسيكية، والمتغيرات القيفاوية من النوع الثاني؛ مما أوضح أنَّ «إم ٣١» أبعد مما أعلنه هابِل. يبلغ التقدير الحالي للمسافة التي تبعدها مجرة «إم ٣١» ٢٫٥ مليون سنة ضوئية.

كان هابِل مهتمًّا بالمجرات على نحوٍ خاص، واخترع نظامًا تصنيفيًّا يستند إلى شكلها المرئي. لقد ميَّز بين أربعة أنواع أساسية: المجرات البيضاوية، والمجرات الحلزونية، والمجرات الحلزونية المضلعة، والمجرات غير المنتظمة. تطرح المجرات الحلزونية على وجه التحديد قضايا رياضية مذهلة؛ لأنها توضح لنا تبعات قانون الجاذبية على نطاق ضخم، وما ينبثق عنها هو نمط ضخم بالقدر نفسه. صحيح أنَّ النجوم تبدو منثورة في سماء الليل عشوائيًّا، لكنك عندما تضع ما يكفي منها معًا، تحصل على شكل منتظم على نحوٍ غامض.

لم يُجِب هابل عن الأسئلة الرياضية، لكنه بدأ الموضوع بأكمله. ومن مساهماته البسيطة والمؤثِّرة في الوقت نفسه، تنظيم أشكال المجرات في مخطط على شكل شوكة



تصنيف الشوكة الرنانة الذي ابتكره هابل لتصنيف المجرات. حُذِفت المجرات غير المنتظمة.

رنانة. عيَّن أنواعًا رمزية لهذه الأشكال: من E1 إلى E7 للمجرات البيضاوية، والأنواع Sa وSb وSc للمجرات الحلزونية، والأنواع SBa وSBb وSBc للمجرات الحلزونية المضلعة. كان تصنيفه تجريبيًّا؛ أي أنه لا يستند إلى أي نظرية تفصيلية أو نظام للقياسات. غير أنَّ العديد من فروع العلوم المهمة قد بدأت بالتصنيفات التجريبية، ومن بينها الجيولوجيا وعلم الجينات. ففور أن يصبح لديك قائمة منظمة، يمكنك أن تبدأ في تحديد الكيفية التي تتلاءم بها الأمثلة المختلفة معًا.

اعتقد العلماء لبعض الوقت أنَّ المخطط ربما يوضح التطور الطويل الأمد للمجرات؛ إذ تبدأ على صورة عناقيد بيضاوية متكتلة من النجوم، ثم تتوزع على سُمك أرفع وتتحول إما إلى أشكال حلزونية، أو إلى قضبان وأشكال حلزونية، وفقًا لتوليفة الكتلة والقُطر وسرعة الدوران. بعد ذلك، تصبح الأشكال الحلزونية فضفاضة للغاية، إلى أن تفقد المجرة كثيرًا من هيكلها وتكاد أن تصبح غير منتظمة. لقد كانت فكرة جذابة؛ لأنَّ مخطط راسل-هرتزبرونج للأنواع الطيفية للنجوم يمثل التطور النجمي إلى حدٍّ ما. غير أنَّ العلماء يعتقدون الآن أنَّ مخطط هابِل تصنيف للأشكال المحتملة، بينما لا تتطور المجرات على هذا النحو المرتب.

مقارنةً بالتكتلات العديمة الشكل للمجرات البيضاوية، يصبح الانتظام الرياضي الذي تتسم به المجرات الحلزونية، والمجرات الحلزونية المضلعة بارزًا بوضوح. لماذا تتخذ الكثير

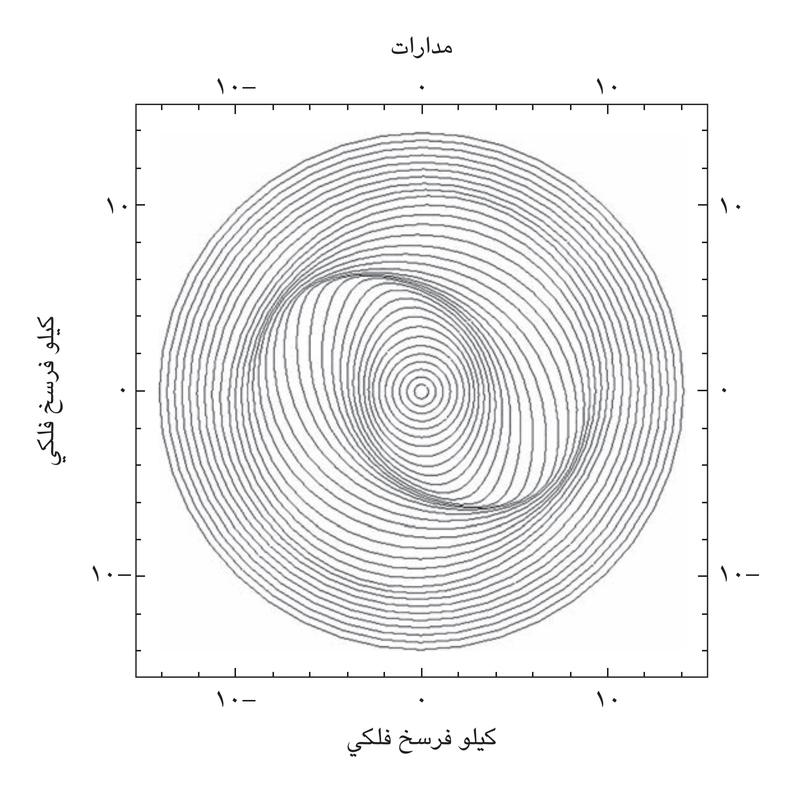
جدًّا من المجرات الشكل الحلزوني؟ ومن أين يأتي القضيب المركزي الذي يوجد في نصفها تقريبًا؟ ولماذا لا يوجد في النصف الآخر منها أيضًا؟ ربما تعتقد أنَّ الإجابة عن هذه الأسئلة أمر سهل نسبيًّا: إعداد نموذج رياضي، التوصل إلى حله من خلال محاكاته على جهاز كمبيوتر على الأرجح، ثم مراقبة ما يحدث. ولأنَّ النجوم المكوِّنة للمجرات تنتشر على نحوٍ متناثر نسبيًّا، ولا تتحرك بسرعة تقترب من سرعة الضوء، فمن المتوقع أن تكون جاذبية نيوتن دقيقة بالدرجة الكافية.

خضعت نظريات عديدة من ذلك النوع للدراسة. وما من تفسير محدَّد قد تقدَّم على غيره، لكنَّ بضعًا من هذه النظريات يتلاءم مع الملاحظات على نحوٍ أفضل مما يتلاءم به معظمها. قبل ٥٠ عامًا فحسب، كان معظم علماء الفلك يعتقدون أنَّ المجالات المغناطيسية هي السبب في اتخاذ المجرات الشكل الحلزوني، لكننا نعرف الآن أنَّ هذه المجالات أضعف كثيرًا من أن تفسِّر الأشكال الحلزونية. واليوم، ثمَّة اتفاق عام على أنَّ الشكل الحلزوني ينتج عن قوى الجاذبية بصفة أساسية. أما الكيفية المحددة لحدوث ذلك، فتلك قضية أخرى.

إحدى أولى النظريات التي تحظى بقبول واسع النطاق كانت من اقتراح بيرتيل ليندبلاد عام ١٩٢٥، وهي تقوم على أساس نوع محدَّد من الرنين. على غرار بوانكاريه، تخيَّل ليندبلاد وجودَ جسيم في مدار دائري تقريبًا، في منظر جذبوي دوَّار. وفقًا للتقدير المبدئي، يدخل الجسيم بالنسبة إلى الدائرة ويخرج، بتردد طبيعي محدد. يحدث رنين ليندبلاد حين يتخذ هذا التردد علاقة كسرية مع تردد التقاء الجسيم بقمم متتابعة في المنظر.

أدرك ليندبلاند أنَّ أذرع المجرة الحلزونية لا يمكن أن تكون من البنى الدائمة. ففي النموذج الشائع للكيفية التي تتحرك بها النجوم في مجرةٍ ما، تختلف سرعاتها وفقًا للمسافة القطرية. وإذا ظلت النجوم نفسها في الذراع نفسها طوال الوقت، فستصبح الذراع ملتفَّة بإحكام للغاية؛ وكأنك أفرطت في لف عقارب ساعةٍ ما. وبالرغم من أننا لا نستطيع رصد مجرة على مدار ملايين الأعوام لنرى ما إذا كان اللف يصبح أكثر إحكامًا أم لا، فثمَّة الكثير من المجرات ولا يبدو أيها مفرط الالتفاف. فاقترح ليندبلاند أنَّ النجوم تنزع لإعادة التدوير مرارًا وتكرارًا عبر الأذرع.

في عام ١٩٦٤، اقترح شيا-شياو لين وفرانك شو أنَّ الأذرع هي موجات كثافة تتراكم فيها النجوم مؤقتًا. تتحرك الموجة، مبتلعة نجومًا جديدة بينما تترك النجوم السابقة خلفها، كما أنَّ موجة المحيط تتحرك فيه لمئات الأميال دون أن تحمل مياهًا معها (إلى أن تقترب من اليابسة، وحينها تتراكم المياه وتندفع نحو الشاطئ). تستمر المياه في التعاقب



يمكن للكيفية التي تدور بها النجوم في مدارات إهليلجية أن تشكِّل موجة كثافة حلزونية، وهي تتخذ في هذه الحالة شكلًا حلزونيًّا مضلعًا.

فحسب، بينما تمر الموجة. استخدم ليندبلاد وبير أولوف ليندبلاد هذه الفكرة وعملا على تطويرها. وقد اتضح أنَّ رنين ليندبلاد يمكن أن يشكِّل موجات الكثافة هذه.

تتمثَّل النظرية البديلة الأساسية في أنَّ هذه الأذرع هي موجات صدمية في الوسيط بين النجمي، حيث تتراكم المادة؛ وهو ما يدشِّن تكوُّن النجوم حين تصبح على درجة كافية من الكثافة. ومن المحتمل أيضًا أن يتمثَّل السبب في توليفة تجمع بين الآليتين.

سادت هاتان النظريتان بشأن تكوُّن أذرع المجرات الحلزونية لأكثر من ٥٠ عامًا. غير أنَّ التقدُّمات الرياضية الحديثة تقترح شيئًا مختلفًا للغاية. والمثال الأساسي على ذلك هو المجرات الحلزونية المضلعة؛ فهي تتضمن الأذرع الحلزونية المميزة، لكنها تحتوي

أيضًا على قضيب مستقيم في منتصفها. وتُعد المجرة «إن جي سي ١٣٦٥» من أمثلتها النموذجية.



المجرة الحلزونية المضلعة «إن جي سي ١٣٦٥» في عنقود «فورنكس» المجري.

من الطرق التي يمكن استخدامها لفهم ديناميكيات المجرة، إعداد محاكاة الأجسام «ن»، مع وضع قيم كبيرة لـ «ن»؛ وذلك لتصميم نموذج للكيفية التي يتحرك بها كل من النجوم، استجابة لشد الجاذبية الناتج عن جميع النجوم الأخرى. يستلزم التطبيق الواقعي لهذه الطريقة وجود بضع مئات المليارات من الأجسام، غير أنه لا يمكن إجراء الحسابات لهذا العدد؛ لذا تُستخدَم نماذج أبسط بدلًا من ذلك. يقدِّم أحدها تفسيرًا للنمط المنتظم الذي تتخذه أذرع المجرات الحلزونية. ومن المفارقات أنَّ هذا النمط ينتج عن الفوضى.

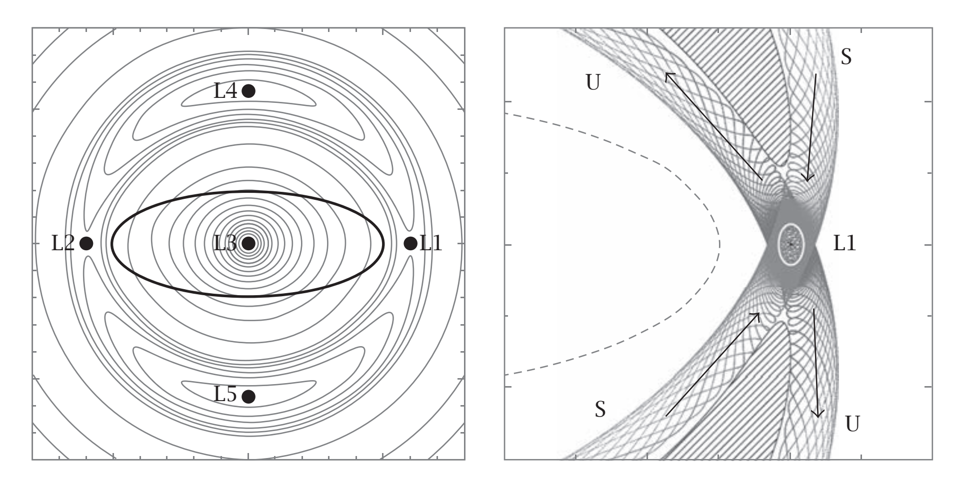
إذا كنت تعتقد أنَّ مصطلح «الفوضى» ليس سوى مرادف أنيق لكلمة «العشوائية»، فسيصعب عليك إدراك أنَّ السبب في ظهور نمط منتظم قد يكون فوضويًّا. يحدث هذا

لأنَّ الفوضى ليست عشوائية في حقيقة الأمر. وإنما هي نتيجة لقواعد حتمية. وتمثل تلك القواعد من ناحيةٍ ما، أنماطًا خفية تشكل أساسًا للفوضى. ففي المجرات الحلزونية المضلعة تتسم النجوم، كلٌّ على حدة، بالفوضوية، لكنَّ حركتها تحتفظ للمجرة بشكلها الحلزوني العام. فبينما تتحرك النجوم بعيدًا عن تكتلاتها باتجاه الأذرع الحلزونية، تتخذ مكانها نجوم جديدة. إنَّ إمكانية وجود أنماط في الديناميكيات الفوضوية، تمثل تحذيرًا للعلماء الذين يفترضون أنَّ النتيجة التي تتخذ نمطًا ما، لا بد أن يكون لسببها نمط أيضًا.

في أواخر سبعينيات القرن العشرين، صمَّم جورج كونتوبولوس وزملاء له نماذج لمجرات حلزونية مضلعة، بافتراض وجود قضيب مركزي يدور على نحو ثابت، وباستخدام نماذج الأجسام «ن» لتحديد ديناميكيات النجوم في الأذرع الحلزونية، والتي يتسبَّب فيها دوران القضيب المركزي. إنَّ هذا الإعداد يتضمن افتراض بنية القضيب، لكنه يوضح أنَّ الشكل المرصود منطقي. وفي عام ١٩٩٦، اكتشف ديفيد كوفمان وكونتوبولوس أنَّ الأجزاء الداخلية من الأذرع الحلزونية، والتي تتفرع على ما يبدو من أطراف القضيب، تظل موجودة بفعل النجوم التي تتبع مدارات فوضوية. فالمنطقة المركزية، لا سيما القضيب، تدور كجسم متصلب، ويُعرَف هذا التأثير باسم الدوران المتزامن. تنتمي النجوم التي تشكِّل الأذرع الداخلية إلى ما يُعرف باسم «المجموعة الساخنة»، وهي تتجول على نحوٍ فوضوي دخولًا إلى المنطقة المركزية وخروجًا منها. أما الأذرع الخارجية، فهي تتشكَّل من نجوم تتبع مدارات أكثر انتظامًا.

يتسم القضيب الدوار بمنظر جاذبية شديد الشبه بذلك الذي تتخذه معضلة الجسمين ونصف التي وضعها بوانكاريه، لكنهما يختلفان في الهندسة. لا تزال هناك خمس من نقاط لاجرانج؛ حيث تظل شذرة الغبار ساكنة في إطار مرجعي يدور مع القضيب، لكنها تتخذ ترتيبًا جديدًا مختلفًا على شكل الصليب. غير أنَّ النموذج يتضمن الآن ما يقرب من ١٥٠ ألف شذرة غبار تؤثر هي والنجوم الأخرى بعضهما على بعض بالقوى، لكنها تؤثِّر على القضيب. من الناحية الرياضية، يمثل هذا النموذج محاكاة لـ ١٥٠ ألف جسم في منظر جذبوي ثابت لكنه دوَّار.

ثلاث من نقاط لاجرانج: L3 وL4 وL5، نقاط مستقرة. أما النقطتان الأخريان، L1 وL2، فهما سرجان غير مستقرين، ويقعان بالقرب من أطراف القضيب، التي توضَّح في الصورة بشكل بيضاوي. والآن، نحتاج إلى جرعة سريعة من الديناميكيات غير الخطية. يرتبط بالاتزانات من نوع السرج، سطحان مميزان متعددا الأبعاد يُعرفان باسم المشاعب



على اليسار: نقاط لاجرانج في حالة القضيب الدوار. على اليمين: مشاعب S المستقرة، ومشاعب U غير المستقرة بالقرب من النقطة L1.

المستقرة، والمشاعب غير المستقرة. وبالرغم من أنَّ هذين الاسمين، قد يسببان قدرًا من الإرباك. فليس المقصود منهما أنَّ المدارات المرتبطة بهما مستقرة أو غير مستقرة. وإنما يشيران إلى اتجاه التدفُّق الذي يحدِّد هذين السطحين فحسب. إذا وُضِعت شذرة غبار على مشعب السرج فسوف تقترب من نقطة السرج وكأنها تُجذَب إليها، أما إذا وُضِعت على المشعب غير المستقر، فستتحرك بعيدًا وكأنها تنفر عنه. وإذا وُضِع جسيمٌ ما في أي مكان آخر، فإنه سيتبع مسارًا يجمع بين كلا نوعي الحركة. إنَّ تخيُّل هذين السطحين هو ما أدَّى ببوانكاريه إلى التوصُّل إلى اكتشافه المبدئي للفوضى في معضلة الجسمين ونصف. فهما يتقاطعان في تشابك تماثلي.

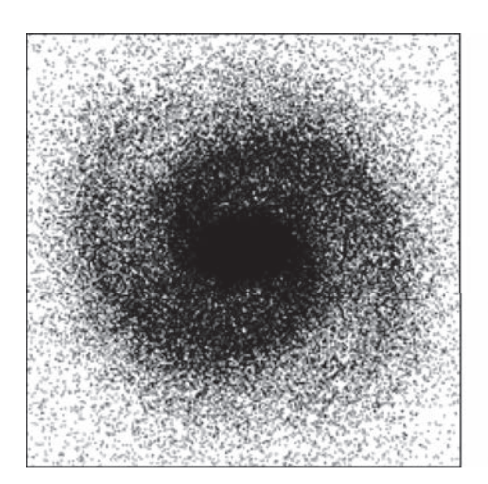
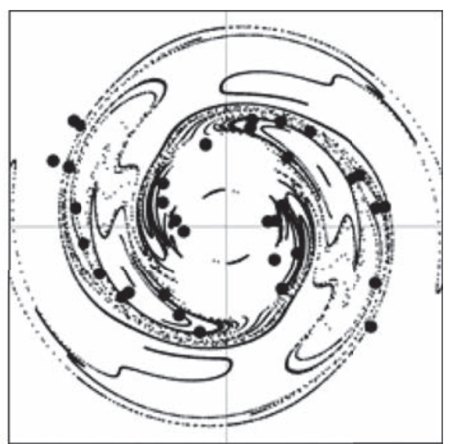
لو أنَّ الموقع هو كلُّ ما يهم في المعضلة، لأصبحت المشاعب المستقرة وغير المستقرة منحنيات تتقاطع عند نقطة السرج. تترك الخطوط المحيطية بالقرب من النقطتين L1 وL2 فجوة على شكل صليب، تظهر مكبَّرة في الصورة الموجودة على اليمين. تمر هذه المنحنيات عبر منتصف الفجوات. غير أنَّ المدارات الفلكية تنطوي على السرعات المتجهة إضافةً إلى المواقع. وهذه الكميات معًا تحدِّد فضاءً متعدِّد الأبعاد يُعرف باسم «فضاء الطور». وهنا، لا بد من استكمال بُعدي الموقع الموضحين مباشرة في الصورة، ببُعدين آخرين من السرعة المتجهة. إنَّ فضاء الطور «رباعيُّ» الأبعاد، أما المشاعب المستقرة وغير

المستقرة فهي أسطحٌ ثنائية الأبعاد، وتظهر في الصورة الموجودة على اليمين على شكل أنابيب مميزة بالأسهم. يرمز الحرف S إلى المشعب المستقر، ويرمز الحرف U إلى المشعب غير المستقر.

حيثما تلتقي هذه الأنابيب، تعمل بمثابة بوابات بين منطقة الدوران المتزامن وما يقع خارجها. يمكن للنجوم أن تمر عبرها إلى الداخل أو الخارج، في الاتجاهات الموضحة بالأسهم، ويمكنها أيضًا أن تبدِّل هذه الأنابيب على نحوٍ فوضوي حيث تعبر. إذن، تمر بعض النجوم التي تقع في منطقة الدوران المتزامن عبر هذه البوابة، وتنطلق في الأنبوب المميز بالحرف U ويقع أسفل اليمين. وفي هذه المرحلة، تتدخل ظاهرة تُعرف باسم «الالتصاق». فبالرغم من فوضوية الديناميكيات، فإنَّ النجوم التي تخرج عبر هذه البوابة تبقى بالقرب من المشعب غير المستقر لفترة طويلة، ربما تكون أطول من عمر الكون. وبعد هذا كله، تتدفق النجوم بالقرب من النقطة L1، ثم تتبع الفرع المتجه إلى الخارج من المشعب غير المستقر، الذي ينقلب هنا باتجاه عقارب الساعة. يحدث الأمر نفسه عند النقطة L2، حول المجرة بمقدار ١٨٠ درجة، ويسير التيار ثانية إلى اتجاه عقارب الساعة.

في نهاية المطاف، يعود الكثير من هذه النجوم إلى منطقة الدوران المتزامن، ويحدث كل شيء من جديد، لكنه لا يحدث على فترات زمنية منتظمة بسبب الفوضى. وبهذا؛ فما نراه هو زوج من الأذرع الحلزونية التي تنبثق من أطراف القضيب بزاوية، بينما يدور الشكل بأكمله على نحوٍ ثابت. لا تبقى النجوم المنفردة في أماكن ثابتة في الأذرع. وإنما هي أشبه بالشرر الذي تطلقه إحدى الألعاب النارية المروحية في أثناء دورانها. باستثناء أنَّ هذا الشرر يعود إلى المنتصف في النهاية، ليُلفَظ بعد ذلك مجددًا، وتتنوع مساراته على نحو فوضوي.

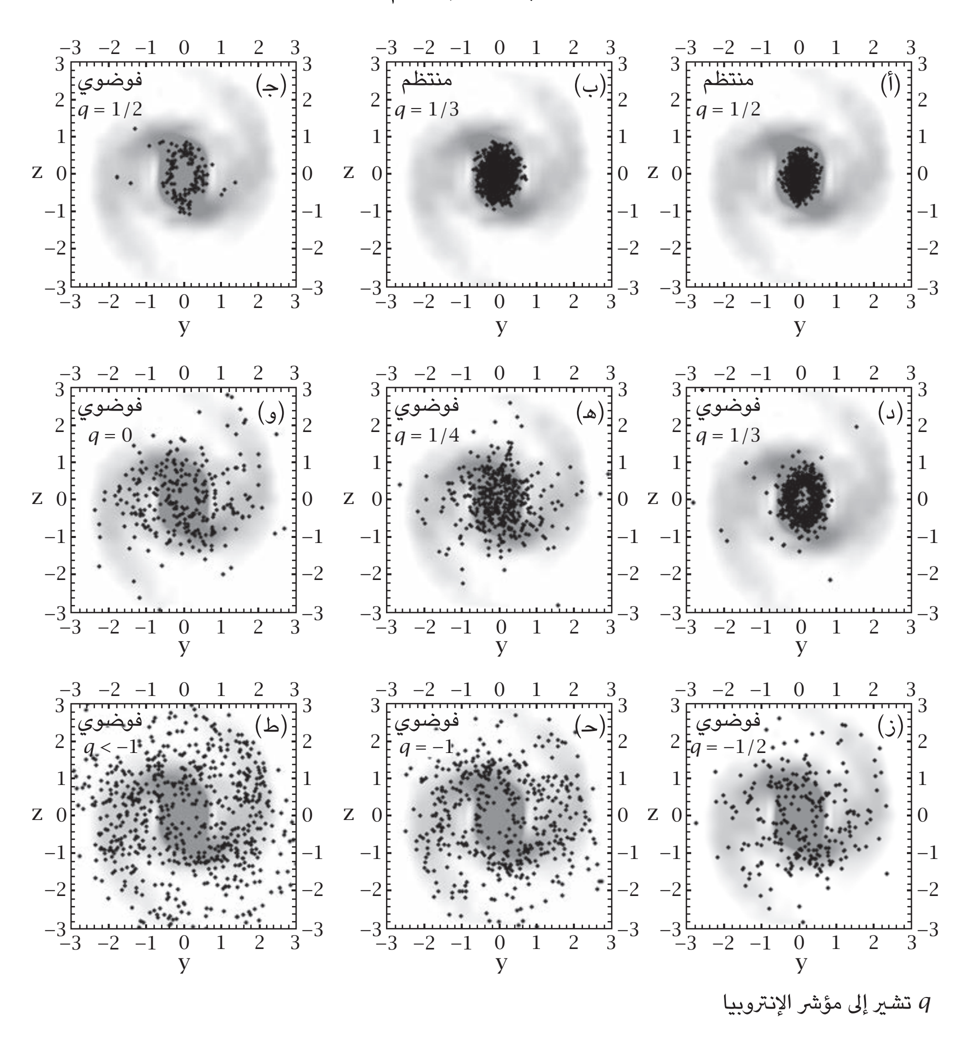
توضح الصورة الموجودة على اليسار مواقع النجوم في وقت نموذجي واحد في محاكاة للأجسام «ن» من هذا النموذج. يتضح في الصورة ذراعان حلزونيتان وقضيب. توضح الصورة الموجودة على اليمين المشاعب غير المستقرة المتناظرة، والتي تتطابق مع أكثر المناطق كثافة في الصورة الموجودة على اليسار. وتوضح الصورة التالية أي أجزاء المجرة تشغله النجوم في مجموعات متنوعة من المدارات المنتظمة والفوضوية. تقتصر المدارات المنتظمة على منطقة الدوران المتزامن، والتي توجد فيها مدارات فوضوية أيضًا مثلما هو متوقع، لكنَّ الثانية تسود خارج هذه المنطقة حيث توجد الأذرع الحلزونية.

على اليسار: إسقاط نظام الأجسام «ن» على المستوى المجري. على اليمين: النمط الحلزوني مع المشاعب غير المستقرة الثابتة المنبثقة من النقطتين L1 وL2.

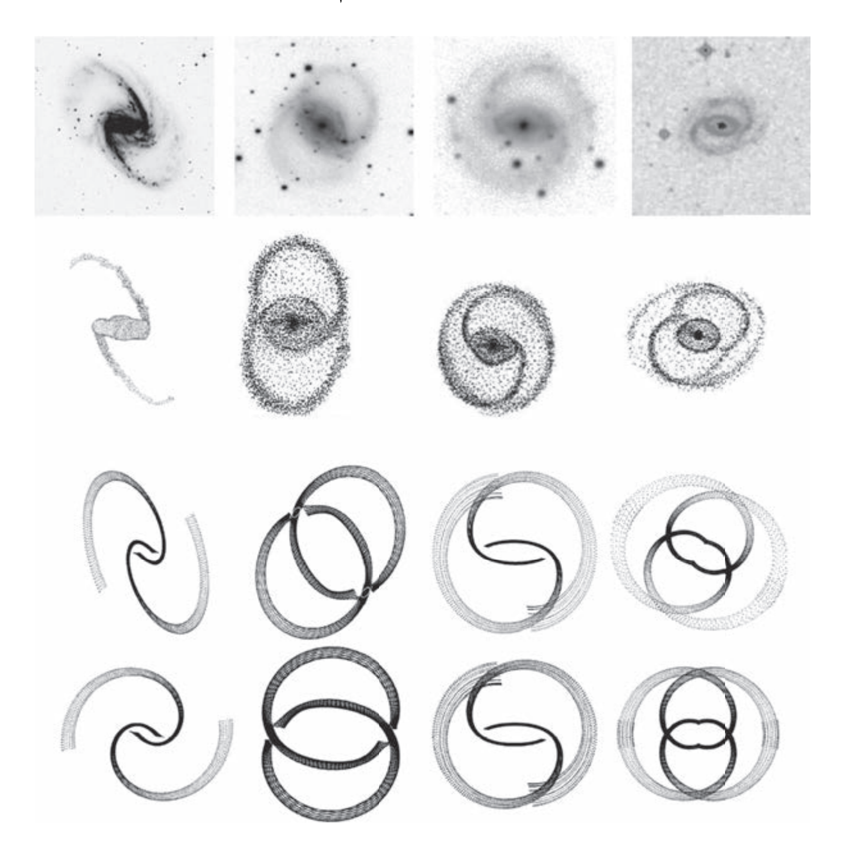
يجدر بنا مقارنة هذه النظرية بتلك السلسلة الملتفة من المدارات الإهليلجية التي تظهر في الصورة التي توضح كيف أن الطريقة التي تدور بها النجوم في مدارات إهليلجية يمكن أن تشكِّل موجة كثافة حلزونية، وهي تتخذ في هذه الحالة شكلًا حلزونيًّا مضلعًا. شكَّلت المدارات الإهليلجية نمطًا لإخراج أحدها. غير أنَّ ديناميكيات الأجسام «ن» الفعلية، لا تنتج مدارات إهليلجية لأنَّ الأجسام تؤدي إلى اضطراب بعضها بعضًا؛ ومن ثمَّ فإنَّ النمط المقترح لا يوفِّر أي تفسير منطقي، إلا أن يكون بمثابة تقدير تقريبي معقول لشيء آخر يوفِّر تفسيرًا منطقيًّا. يؤدي النموذج الفوضوي إلى تشكيل القضيب المركزي بصفته افتراضًا مباشرًا، لكن كل شيء آخر ينبثق من نظام حقيقي لديناميكيات الأجسام «ن». تكون الفوضى هي ما نحصل عليه — مثلما قد نتوقع ذلك — لكننا نحصل أيضًا على النمط الحلزوني الذي تخلقه الفوضى. ينطوي ذلك الأمر على رسالة: إذا تناولت الرياضيات بجدية، فسوف تظهر الأنماط من تلقاء نفسها. أما إذا فرضت الأنماط على نحو اصطناعي، فإنك تغامر بالحصول على نتيجة غير منطقية.

ثمَّة تأكيد إضافي على أنَّ الفوضى اللزجة تؤدي دورًا في تكون الأشكال الحلزونية للمجرات الحلزونية المضلعة. وذلك هو ما يوجد بكثرة في هذا النوع من المجرات؛ إذ تكون حلقات النجوم شديدة الانتظام في الشكل، وغالبًا ما تتشابك في أزواج. نؤكد ثانية على أنَّ الفكرة هي أنَّ الفوضى اللزجة في تلك المجرات تؤدي إلى اصطفاف العديد من النجوم



مواقع لحظية لجسميات تنتمي إلى مجموعات مختلفة من المدارات المنتظمة والمدارات الفوضوية (النقاط السوداء) مُضافةً إلى العمود الفقري للمجرة على مستوى الدوران (الخلفية الرمادية).

مع المشاعب غير المستقرة للنقطتين L1 وL2 على أطراف القضبان. وفي هذه المرة نتناول المشاعب المستقرة أيضًا، والتي تعود النجوم عبرها إلى البوابات، ثم إلى الباطن مرةً أخرى. فهذه المشاعب لزجة هي أيضًا.



بنية الأذرع الحلقية والحلزونية. الصف الأعلى: أربع مجرات: «إن جي سي ١٣٦٥» و«إن جي سي ٢٦٦٥» و«إي إس أوه ٣٢٥-٢٨» و«إي إس أوه ٥٠٧-١٦». الصف الثاني: رسم تخطيطي بالنقاط لهذه المجرات، يوضح البنى الحلزونية والحلقية. الصف الثالث: أمثلة من حسابات المشاعب المستقرة/غير المستقرة ذات البنية المتشابهة، وهي مُعدَّة بالطريقة نفسها تقريبًا التي تظهر في المجرة المرصودة أو الرسم التخطيطي بالنقاط. الصف الرابع: منظر أمامي لهذه المشاعب مع وجود القضيب على المحور x.

يوضح الصف الأول من الصورة التالية أربعة أمثلة نموذجية للمجرات الحلقية. ويوضح الصف الثاني رسومات تؤكد على بُناها الحلزونية والحلقية. ويوفر الصف الثالث أمثلة متطابقة من النموذج الرياضي. ويقدم الصف الرابع منظرًا أماميًّا للمجرات، لا منظرًا بزاوية.

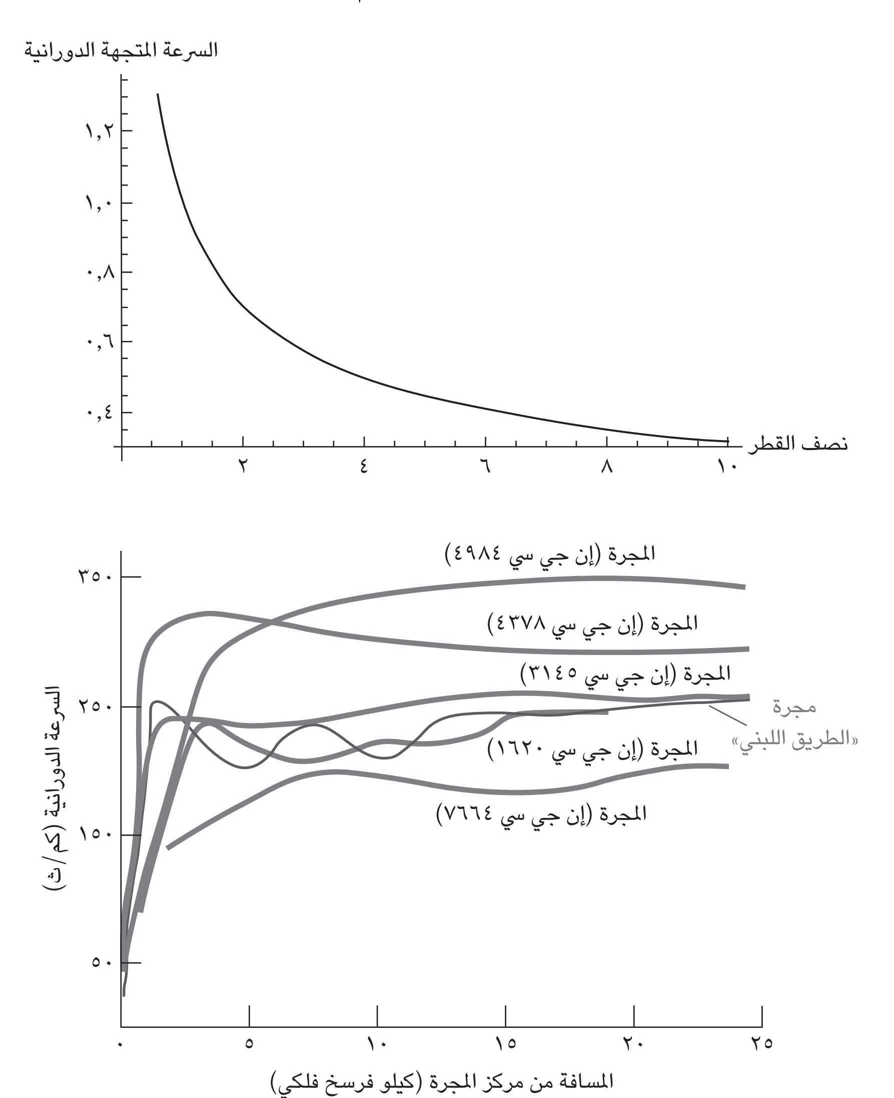
يمكن تقدير السرعة التي تتحرك بها النجوم في إحدى المجرات باستخدام المنظار الطيفي. وحين قام علماء الفلك بذلك، كانت النتائج محيرة للغاية. وسوف أذكر هذا اللغز المحير هنا، وأترك الحل الحالي له إلى الفصل الرابع عشر.

يقيس علماء الفلك سرعة دوران المجرات باستخدام تأثير دوبلر. إذا كان المصدر المتحرك يصدر ضوءًا له طول موجي محدد، فإنَّ هذا الطول الموجي يتغير وفقًا للسرعة المتجهة التي يتحرك بها المصدر. ينطبق التأثير نفسه على الموجات الصوتية، والمثال الأشهر على ذلك هو انخفاض حدة نغمة سرينة سيارة الإسعاف حينما تمر بك. وفي عام ١٨٤٢، حلل الفيزيائي كريستيان دوبلر هذا التأثير في ورقة عن النجوم الثنائية، باستخدام الفيزياء النيوتونية. وتتنبأ نسخة التحليل التي تستخدم نظرية النسبية بالسلوك الأساسي نفسه، لكنها تنطوي على اختلافات كمية. ذلك أنَّ الضوء يتخذ العديد من الأطوال الموجية بالطبع، لكنَّ التحليل الطيفي يوضح بعض الأطوال الموجية المعينة في صورة خطوط داكنة في الطيف. وحين يتحرك المصدر، تتغير تلك الخطوط بمقدار ثابت، ويمكن حساب السرعة المتجهة من مقدار التغير بصورة مباشرة.

في حالة المجرات، يتمثَّل الخط الطيفي القياسي المستخدم لهذا الغرض في خط هيدروجين ألفا. وفي حالة المصدر الساكن، يوجد هذا الخط في الجزء الأحمر المركزي من الطيف المرئي، وهو يظهر حين ينتقل أحد الإلكترونات في ذرة هيدروجين من ثالث أدنى مستويات طاقته إلى ثاني أدنى مستوى. ولما كان الهيدروجين هو أكثر العناصر شيوعًا في الكون، فإنَّ خط هيدروجين ألفا غالبًا ما يكون بارزًا.

يمكن أيضًا قياس سرعة دوران المجرات غير البعيدة «للغاية»، وهي على مسافات مختلفة من مركز المجرة. تحدِّد هذه الحسابات منحنى دوران المجرة، وقد اتضح أنَّ سرعة الدوران لا تتوقف إلا على المسافة من المركز. فبدرجة تقريبية جيدة، تتحرك المجرات مثلما تتحرك مجموعة من الحلقات متحدة المركز التي يدور كلٌّ منها على نحوٍ ثابت، لكنَّ السرعة يمكن أن تتغير من حلقة إلى حلقة. ويستدعي هذا الوصف نموذج لابلاس لحلقات زحل (الفصل السادس).

في هذا النموذج، تؤدي قوانين نيوتن إلى عَرَض رياضي أساسي يتمثَّل في صيغةٍ تربط سرعة الدوران عند نصف قطر محدد بإجمالي الكتلة داخل نصف القطر ذاك. (تتحرك النجوم ببطء شديد مقارنةً بسرعة الضوء، حتى إنَّ التعديلات النسبوية تُعتبر غير مهمة بصفة عامة.) تنص الصيغة على أنَّ إجمالي كتلة المجرة حتى نصف قطر محدَّد، يساوي



أعلى: منحنى الدوران مثلما تتنبأ به قوانين نيوتن. المقاييس بوحدات تقريبية. أسفل: منحنيات الدوران المرصودة لست مجرات.

نصف القطر ذاك مضروبًا في السرعة المتجهة الدورانية للنجوم عند تلك المسافة، ومقسومًا على ثابت الجاذبية.[1] يمكن إعادة ترتيب هذه الصيغة للتعبير عن السرعة المتجهة الدورانية

عند نصف قطر معين، وهي تساوي نصف القطر مضروبًا في الجذر التربيعي لإجمالي الكتلة داخل نصف القطر ذاك، ومضروبًا في ثابت الجاذبية. تُسمَّى هذه الصيغة في أيٍّ من نسختيها، بمعادلة كيبلر لمحور الدوران؛ لأنها يمكن أن تُشتَق مباشرة من قوانين كيبلر أيضًا.

من الصعب قياس توزيع الكتلة مباشرة، لكنَّ ثمَّة تنبؤًا واحدًا مستقلًّا عن مثل تلك الاعتبارات، وهو الكيفية التي يتصرف بها منحنى الدوران في أنصاف الأقطار الكبيرة بالدرجة الكافية. ففور أن يقترب من نصف القطر المرصود للمجرة، يصبح إجمالي الكتلة داخل نصف القطر ذاك مساويًا لإجمالي كتلة المجرة. إذن فحين يكون نصف القطر كبيرًا بما يكفي، تتناسب السرعة الدورانية طرديًّا مع مقلوب الجذر التربيعي لنصف القطر. توضح الصورة العليا تمثيلًا بيانيًّا لهذه الصيغة التي تتضاءل إلى الصفر مع زيادة نصف القطر.

وللمقارنة، توضح الصورة السفلى منحنيات الدوران المرصودة لست مجرات، ومنها مجرتنا. وبدلًا من التضاؤل، تزيد السرعة الدورانية ثم تظل ثابتة تقريبًا.

عذرًا!

الفصل الثالث عشر

عوالم فضائية

«كان من الممكن أن يفحص علماء الفلك الفضائيون الأرضَ لأكثر من ٤ مليارات عام دون أن يرصدوا أية إشارة راديوية، رغم حقيقة أنَّ كوكبنا هو المثال النموذجي على الكواكب الصالحة للحياة.»

سيث شوستاك، «عوالم كلينجون»

لطالما كان امتلاء الكون بالكواكب بندًا من بنود الإيمان بين كتَّاب الخيال العلمي. وما حفَّز وجود مثل ذلك الاعتقاد بصفة أساسية هو الضرورة السردية؛ فلا بد من وجود كواكب لتصير مواقع تدور فيها القصص المثيرة. بالرغم من هذا، دائمًا ما بدا ذلك وجيهًا من الناحية العلمية. فبالنظر إلى مقدار النفايات الكونية التي تأتي في جميع الأشكال والأحجام وتتحرك داخل الكون، لا بد من وجود الكثير من الكواكب.

منذ زمن بعيد يعود إلى القرن السادس عشر، قال جيوردانو برونو إنَّ النجوم شموس بعيدة ولها كواكبها الخاصة. ولما كان شوكة في ظهر الكنيسة الكاثوليكية، فقد أُحرِق على الوتد بتهمة الهرطقة. وفي نهاية كتابه «الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية»، كتب نيوتن: «إذا كانت النجوم الثابتة مراكز لأنظمة مشابهة [أي مشابهة للنظام الشمسي]، فستكون مبنية وفقًا لتصميم مشابه ...»

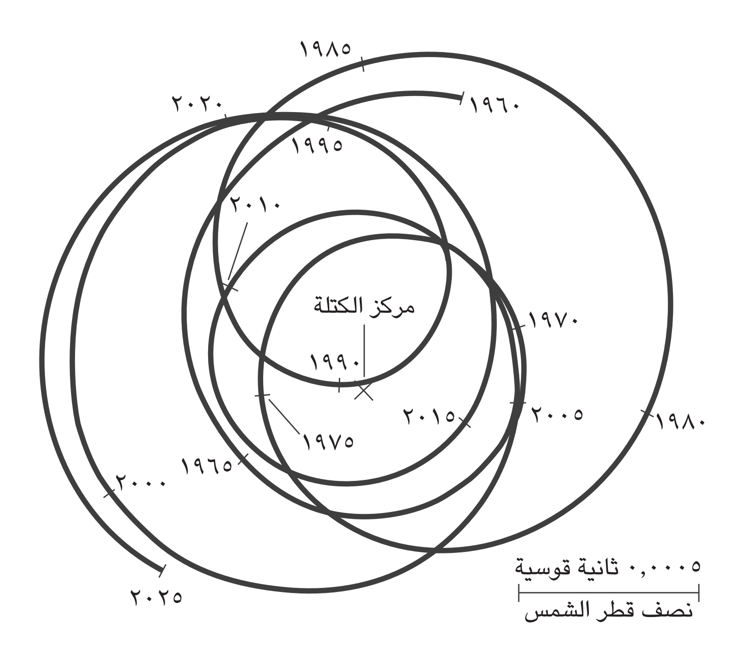
اعترض علماء آخرون زاعمين أنَّ الشمس هي النجم الوحيد في الكون الذي يملك كواكب. غير أنَّ الغالبية العظمى دائمًا ما كانت تعتقد بوجود ما لا يُحصى من الكواكب الخارجية، مثلما يُطلق عليها. تتمثَّل أفضل النظريات بشأن تكوُّن الكواكب في انهيار غيمة غازية ضخمة تكوِّن الكواكب ونجمها المركزي في الوقت نفسه، ومثل هذه الغيوم

موجود بكثرة. يوجد ٥٠ كنتيليون من الأجسام الكبيرة — النجوم — وعدد أكبر كثيرًا من الأجسام الصغيرة؛ جسيمات الغبار. سيكون غريبًا إذا كان ثمَّة نطاق الأحجام المتوسطة المحظور، وسيكون من الأغرب إذا حدث وتصادف مع الأحجام المعتادة للكواكب.

لا بأس بالحجج غير المباشرة على الإطلاق، لكنَّ المشكلة الجلية التي كان الجميع يتحاشونها، لوحظت بسبب غيابها. فحتى وقت قريب، لم يكن ثمَّة دليل رصدي على وجود كواكب لأي من النجوم الأخرى. وفي عام ١٩٥٢، اقترح أوتو ستروف طريقة عملية لاكتشاف الكواكب الخارجية، لكنَّ أربعين عامًا قد مرت قبل أن تأتي بثمارها. رأينا في الفصل الأول كيف أنَّ الأرض والقمر يتصرفان كأنهما رجلٌ سمين وطفل يرقصان معًا. يظل الطفل يدور ويدور بينما يرتكز الرجل على قدميه. ينطبق الأمر نفسه على كوكب يدور بنجم؛ إذ يتحرك الكوكب الخفيف الوزن في مدارٍ إهليلجي كبير، بينما يتأرجح النجم الثقيل قليلًا.

اقترح ستروف استخدام منظار تحليل طيفي لاكتشاف هذا التأرجح. يتسبَّب تأثير دوبلر في أن تؤدي أي حركة للنجم إلى انزياح خيوطه الطيفية قليلًا. نعرف السرعة المتجهة للنجم من مقدار الانزياح، ونستدل على وجود الطفل الدوَّار بمراقبة الكيفية التي يتأرجح بها الرجل السمين. تنجح هذه الطريقة حتى في حالة وجود العديد من الكواكب؛ إذ يستمر النجم في التأرجح لكن بطريقة أكثر تعقيدًا. توضح الصورة كيفية تأرجح الشمس. يحدث الجزء الأكبر من الحركة بسبب المشتري، لكنَّ الكواكب الأخرى تساهم فيها أيضًا. تبلغ الحركة الإجمالية ثلاثة أضعاف نصف قطر الشمس تقريبًا.

أدَّى أسلوب استخدام مطيافية دوبلر الذي اقترحه ستروف إلى اكتشاف أول كوكب خارجي ثبت رصده في عام ١٩٩٢، على يد ألكسندر فولشتشان وديل فريل. ينتمي النجم الذي يدور حوله هذا الكوكب إلى نوع غريب من الأجسام النجمية يُعرف باسم النجم النابض. تطلق هذه الأجسام نبضات راديوية سريعة منتظمة. يفسِّر العلماء هذا السلوك الآن على أنها نجوم نيوترونية تدور بسرعة، وقد سُمِّيت بذلك لأنَّ معظم مادتها من النيوترونات. استخدم فولشتشان وفريل علم الفلك الراديوي لتحليل الاختلافات الطفيفة في النبضات المنبعثة من النجم النابض «بي إس آر ١٢٥٧ + ١٢»، واستنتجا منها وجود كوكبين على الأقل يدوران به. وهذا يغيِّر دورانه على نحوٍ طفيف ويؤثِّر في توقيت النبضات. ثبتت النتيجة التي توصَّلا إليها عام ١٩٩٤، مع التأكيد على وجود نجم ثالث.



حركة الشمس بالنسبة إلى مركز كتلة النظام الشمسي، من ١٩٦٠ إلى ٢٠٢٥.

تُعد النجوم النابضة غير اعتيادية بعض الشيء، وهي لا توضح شيئًا مهمًّا عن النجوم العادية. غير أنَّ تلك النجوم بدأت تكشف عن أسرارها. ففي عام ١٩٩٥، اكتشف ميشيل مايور وديدييه كويلوز كوكبًا خارجيًّا يدور بالنجم «٥١ بيجاسي» الذي ينتمي إلى الفئة الطيفية العامة (G)، وهي الفئة نفسها التي تنتمي إليها الشمس. اتضح بعد ذلك أنَّ كلتا المجموعتين قد خسرت عام ١٩٨٨ حين لاحظ كلٌّ من بروس كامبل وجوردون ووكر وستيفنسون يانج، أنَّ النجم «جاما سيفي» يتأرجح على نحو مثير للريبة. فلأنَّ النتائج التي توصلوا إليها لم تبلغ سوى حد ما يمكن اكتشافه، لم يزعموا رصد كوكب، لكنَّ المزيد من الأدلة قد ظهر بعد بضع سنوات، وبدأ الفلكيون يعتقدون أنَّ هذا هو ما فعلته المجموعة بالضبط. وثبت وجود الكوكب أخيرًا في عام ٢٠٠٣.

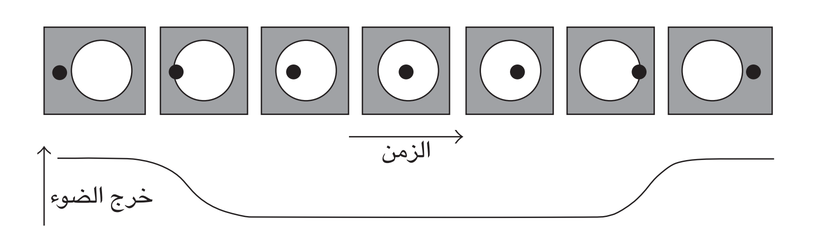
نعرف الآن بوجود ما يزيد على ألفين من الكواكب الخارجية؛ فالرقم الحالي في الأول من يونيو ٢٠١٦، هو ٣٤٢٢ كوكبًا في ٢٥٦٠ من الأنظمة الكوكبية، ومنها ٥٨٢ نظامًا يحتوي على أكثر من كوكب واحد. إضافةً إلى ذلك، توجد الآلاف من الكواكب المحتملة التي لم يثبُت وجودها بعد. بالرغم من ذلك، فما كان يُعتَقد أحيانًا أنه دليل على وجود

كوكب خارجي، يُعاد فحصه الآن وتنحيته باعتباره شيئًا آخر، بينما تستمر الأجسام الأخرى المرشحة في الظهور أيضًا؛ ومن ثمَّ فيمكن لهذه الأرقام أن تنخفض مثلما يمكنها أن ترتفع. في عام ٢٠١٢، أُعلِن أنَّ أحد أفراد أقرب الأنظمة النجمية إلينا، النجم «ألفا سنتوري»، له كوكب في حجم الأرض لكنه أسخن كثيرًا.[1] يبدو الآن أنَّ هذا الكوكب «ألفا سنتوري Bb» غير موجود في الواقع، وإنما هو نتاج التحليل البياني.[2] غير أنَّ ثمَّة كوكبًا خارجيًّا آخر محتملًا هو «ألفا سنتوري Bc»، يدور حول النجم نفسه، وقد اكتُشِف منذ ذلك الوقت. ومن المؤكد أنَّ النجم «جليسي ١١٣٢»، القزم الأحمر الذي يبعد عنا بمقدار ٣٩ سنة ضوئية، له كوكب يُسمى «جي جيه ١١٣٢ بي»، وقد سبب قدرًا كبيرًا من الإثارة لأنه في حجم الأرض (وإن كان أسخن كثيرًا من أن يحتوي على مياه سائلة)، وقريب بما يكفي لملاحظة غلافه الجوي.[3] إنَّ الكثير من الكواكب الخارجية يوجد على بُعد بضع عشرات من السنين الضوئية. ففيما يتعلق بالكواكب، لسنا وحيدين.

في بادئ الأمر، كانت الكواكب الوحيدة التي يمكن رصدها هي «كواكب المشتري الساخنة»؛ أي تلك الكواكب الضخمة التي توجد بالقرب من نجومها. وغالبًا ما كان ذلك يولِّد انطباعًا متحيزًا عن نوع الكواكب الخارجية الموجودة. غير أنَّ التقنيات تغدو أكثر حساسية بوتيرة سريعة، وصار بإمكاننا الآن اكتشاف كواكب في حجم الأرض. ويمكننا أيضًا باستخدام التحليل الطيفي، أن نبدأ في معرفةِ ما إذا كانت تحتوي على أغلفة جوية أو مياه أم لا. وتشير الأدلة الإحصائية إلى أنَّ الأنظمة الكوكبية توجد بكثرة في المجرة؛ بل في الكون بأكمله بالفعل، لكنَّ الكواكب التي تشبه الأرض،[4] ولها مدارات شبيهة بمدار الأرض، وتدور حول نجوم تشبه الشمس، لا تمثل سوى نسبة ضئيلة من بين مليارات النجوم.

توجد طرق عشر أخرى على الأقل لاكتشاف الكواكب الخارجية. من بين هذه الطرق التصوير المباشر، وذلك بتوجيه تلسكوب قوي للغاية نحو أحد النجوم والعثور على كوكب. وهو شبيه بعض الشيء بمحاولة رؤية عود ثقاب في وهج ضوء كشَّاف، لكنَّ تقنيات الحَجب البارعة التي تخفي ضوء النجم نفسه، تجعل الأمر ممكنًا في بعض الأحيان. أما أكثر الطرق شيوعًا لاكتشاف الكواكب الخارجية، فهي طريقة العبور. ذلك أنه إذا حدث وعبر الكوكب قرص النجم، فإنه يحجب جزءًا صغيرًا من خرج الضوء الصادر عن النجم، مثلما يُرى من الأرض. يشكِّل العبور انخفاضًا مميزًا في منحنى

الضوء. من غير المرجح أن تتخذ غالبية الكواكب الخارجية مثل ذلك الاتجاه المواتي، لكنَّ نسبة الكواكب التي تقوم بالعبور، كبيرة بما يكفي لتكون الطريقة مجدية.

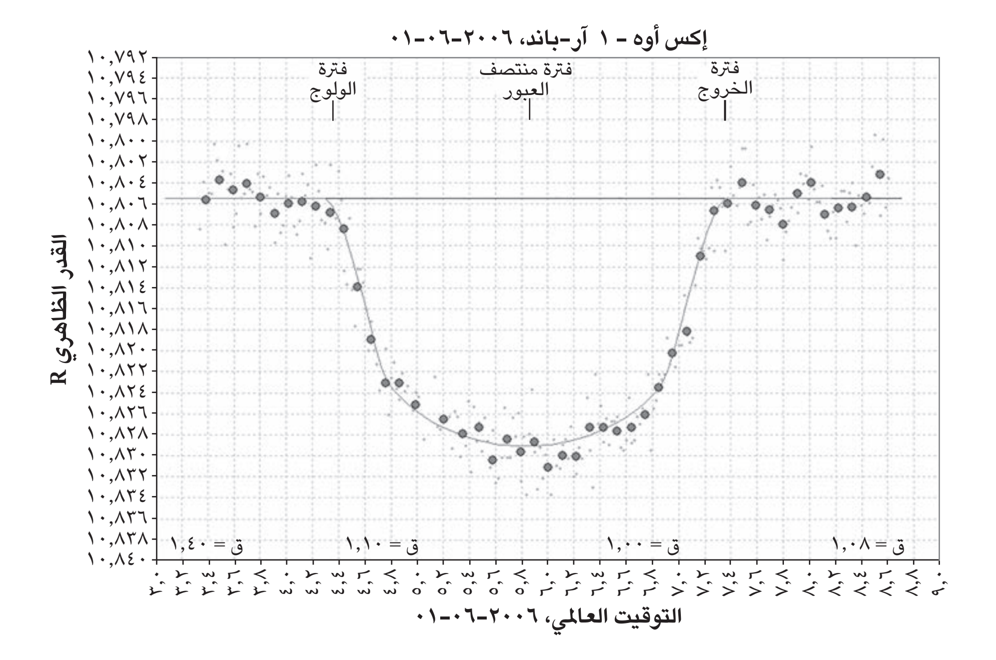


نموذج بسيط للكيفية التي يصبح بها خرج ضوء أحد النجوم أكثر خفوتًا عند عبور كوكبٍ ما. إذا افترضنا أنَّ النجم يصدر الكمية نفسها من الضوء عند كل نقطة، وأنَّ الضوء يحجبها بأكملها، فسيظل منحنى الضوء مستويًا بينما يحجب الكوكب بأكمله الضوء. من الناحية العملية، لا تُعد هذه الافتراضات صحيحة إلى حد كبير، ويستخدم العلماء نماذج أكثر واقعية منها.

تمثل الصورة توضيحًا مبسطًا لطريقة العبور. عندما يبدأ الكوكب عبوره، يحجب بعضًا من ضوء النجم. وعندما يوجد قرص الكوكب بأكمله على قرص النجم، يستقر خرج الضوء ويظل ثابتًا تقريبًا لفترة إلى أن يقترب الكوكب من الحافة الأخرى للنجم. وبينما يخرج الكوكب عبر الحافة، يعود النجم إلى سطوعه الظاهري الأصلي. عادةً ما يبدو النجم في الواقع أقل سطوعًا بالقرب من حوافه، وقد ينحرف جزء من الضوء حول الكوكب إذا كان له غلاف جوي. وبعض النماذج الأكثر تعقيدًا تراعي هذه التأثيرات وتصحِّحها. توضح الصورة منحنى ضوء حقيقي (بالنقاط) لعبور الكوكب الخارجي «إكس أوه – ١ بي» عبر النجم «إكس أوه – ١»، مع نموذج معدَّل (المنحنى المتواصل).

إنَّ تحليل طريقة العبور رياضيًّا يمدنا بمعلومات عن حجم الكوكب وكتلته وفترته المدارية. وهي تخبرنا أحيانًا بالتركيب الكيميائي للغلاف الجوي للكوكب، وذلك من خلال مقارنة طيف النجم بالضوء المنعكس من الكوكب.

اختارت ناسا طريقة العبور لاستخدامها مع تلسكوب «كيبلر» الذي تستخدمه، وهو مقياس ضوئي يقيس مستويات الضوء بدقة بالغة. بدأ تلسكوب «كيبلر» العمل في ٢٠٠٩، وكان يراقب خرج الضوء فيما يزيد عن ١٤٥٠٠٠ نجم. كان مخططًا أن يستمر



منحنى الضوء لعبور الكوكب الخارجي الذي يبلغ حجم المشتري «إكس أوه – ١ بي»، بالنجم «إكس أوه – ١» الذي ينتمي إلى فئة القدر الظاهري R ١٠ × ٨، وذلك بتاريخ ١ يونيو ٢٠٠٦. تعبِّر النقاط المصمتة عن متوسطات الخمس نقاط للقدر الظاهري من الصور الموضحة بالنقاط الصغيرة. يمثل هذا الخط نموذجًا معدَّلًا.

التلسكوب في رصدها على مدار ثلاث سنوات ونصف، لكنَّ العجلات التفاعلية التي تُستخدم للحفاظ على محاذاة التلسكوب، قد بدأت في التداعي. وفي عام ٢٠١٣، تغيَّر تصميم المهمة بما يسمح للآلة المعطلة بإنتاج علوم مفيدة.

يُدعى أول كوكب خارجي اكتشفه «كيبلر» عام ٢٠١٠ «كيبلر-٤ بي». ويقع نجمه الوالِد «كيبلر-٤» على مسافة ١٨٠٠ سنة ضوئية في كوكبة «التنين»، وهو نجم يشبه الشمس لكنه أكبر قليلًا. يبلغ الكوكب حجم نبتون وكتلته تقريبًا، لكنَّ مداره أقرب كثيرًا إلى النجم. تبلغ فترة مداره ٣,٢١ من الأيام، ويبلغ نصف قطره ٠,٠٥ وحدة فلكية؛ أي عُشر المسافة تقريبًا من عطارد إلى الشمس. تبلغ درجة حرارة سطحه ١٧٠٠ درجة كلفن. ويتسم مداره بالانحراف المركزي بمقدار ٠,٢٥.

بالرغم من عجلاته التفاعلية المتداعية، وجد «كيبلر» ١٠١٣ من الكواكب الخارجية التي تدور حول ٤٤٠ نجمًا، إضافة إلى ٣١٩٩ من الكواكب الأخرى المحتملة التي لم يجرِ التأكد منها بعد. من الأسهل إيجاد الكواكب الكبيرة لأنها تحجب قدرًا أكبر من الضوء؛ لذا فهي الأكثر تمثيلًا من بين الكواكب الخارجية التي اكتشفها «كيبلر»، غير أنه يمكن التعويض عن هذه الزيادة في احتمالية اكتشافها. فقد وجد «كيبلر» من الكواكب الخارجية ما يكفي لتوفير تقديرات إحصائية لعدد الكواكب الموجودة في المجرة، والتي تتسم بخصائص معينة. ففي عام ٢٠١٣، أعلنت ناسا أنَّ المجرة تحوي على الأرجح ما لا يقل عن ٤٠ مليارًا من الكواكب الخارجية التي يقترب حجمها من الأرض، وتتحرك في مدارات شبيهة بمدار الأرض، وتدور حول نجوم شبيهة بالشمس وبأقزام حمراء. وإذا كان الأمر كذلك، فإنَّ الأرض بعيدة كل البعد عن التفرد.

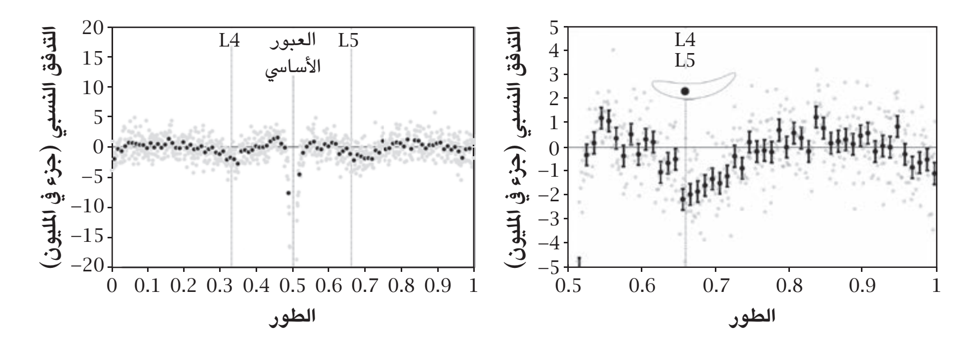
يتضمن فهرس المدارات والأنظمة النجمية العديد من الأنظمة التي تبدو مختلفة للغاية عن النظام الشمسي. فنادرًا ما تنطبق عليها أنماط دقيقة مثل قانون تيتيوس-بوديه. وقد بدأ علماء الفلك الآن في فهم تعقيدات التشريح المقارَن للأنظمة النجمية. ففي ٢٠٠٨، قام كلٌّ من إدوارد توماس، وسوكو ماتسومورا، وفريدريك رازيو، بتصميم نموذج محاكاة للتراكم من الأقراص الكوكبية.[5] وتشير النتائج إلى أنَّ الأنظمة الشبيهة بنظامنا نادرة نسبيًّا، ولا تتشكَّل إلا حين تكون قيم المتغيرات التي تميِّز السمات الأساسية للقرص، قريبة للغاية من تلك القيم التي تتكوَّن عندها الكواكب على الإطلاق. تُعد الكواكب العملاقة أكثر شيوعًا. في فضاء المعلمات الخاص بالأقراص الكوكبية البدائية، كان قرصنا يتقدم نحو حافة الكارثة. لا تزال بعض المبادئ الرياضية الأساسية تنطبق بالرغم من ذلك، لا سيما حدوث الرنين المداري. فعلى سبيل المثال، يوجد في الأنظمة النجمية التالية: «كيبلر-٢٥» و«كيبلر-٢٧»، و«كيبلر-٣٠»، و«كيبلر-٣١»، و«كيبلر-٣٣» كوكبان على الأقل يجمع بينهما رنين مداري بنسبة ١:٢. وتحتوي الأنظمة النجمية التالية: «كيبلر-٢٣» و«كيبلر-٢٤» و«كيبلر-٢٨» و«كيبلر-٣٢»، على كوكبين على الأقل يجمع بينهما رنين مداري بنسبة ٢:٣.

يعمل صائدو الكواكب بالفعل على تكييف أساليبهم للبحث عن سمات أخرى للأنظمة النجمية، ومن بينها الأقمار الخارجية والكويكبات الخارجية، التي يمكن أن تضيف إلى منحنيات الضوء ومضاتٍ إضافية ضئيلة بطريقة معقدة للغاية. يستخدم ديفيد كيبينج

الكمبيوتر الفائق لإعادة فحص بيانات «كيبلر» عن ٥٧ من أنظمة الكواكب الخارجية، بحثًا عن أي دلالة عن الأقمار الخارجية. وقد أجرى رينيه هيلر حسابات نظرية تشير إلى أنَّ ثمَّة كوكبًا خارجيًّا يبلغ حجمه أضعاف حجم المشتري (وهو أمر ليس بغريب) ربما يكون له وجود قمر بحجم المريخ، ويمكن لـ «كيبلر» أن يجده مبدئيًّا. فقمر المشتري، «آيو»، يتسبَّب في حدوث دفقات راديوية تتفاعل مع المجال المغناطيسي للكوكب، وربما تحدث آثار مماثلة في أماكن أخرى؛ ولهذا يبحث خواكين نويولا عن إشارات راديوية من أقمار خارجية. وحين تطلق ناسا عام ٢٠١٨ التلسكوب التابع لها، «جيمس ويب»، وهو خليفة «هابل»، قد يتمكَّن من التقاط قمر خارجيٍّ ما مباشرة.

انكب مايكل هيبكه ودانييل أنجرهاوسن على اصطياد كويكبات خارجية تنتمي إلى النوع «تروجان». ولعلك تتذكر أنَّ كويكبات «تروجان» تتبع الكوكب في المدار نفسه، وتقع على مسافة ٦٠ درجة أمامه أو خلفه؛ لذا فهي تشكل وميضها الضئيل الخاص عند عبورها بالنجم. بحث علماء الفلك عن هذا الوميض، لكنهم لم يعثروا على شيء حتى الآن؛ لأن الأثر يكون ضئيلًا للغاية. وبدلًا من ذلك، يستخدم هيبكه وأنجرهاوسن نهجًا إحصائيًّا أشبه بالتجول في محمية طبيعية وإحصاء آثار خطى الأسود. لا تخبرك هذه الآثار أيُّ الأسود قد صنعتها، لكنك تستطيع تقدير مدى انتشار الأسود. جمعا ما يقرب من مليون منحنًى ضوئي لتعزيز الإشارات المرتبطة بكويكبات «تروجان» الخارجية. توضح النتائج وجود ومضات عند نقطتي «تروجان»، لكنها ليست بارزة إحصائيًّا. أما إذا طوينا الرسم التخطيطي إلى نصفين بحيث تتلاقى المواقع التي تقع أمام المدار بمقدار عدد محدَّد من الدرجات، مع تلك التي تقع خلفه، نحصل على ومضة بارزة إحصائيًّا عند ٦٠ درجة (زائد أو ناقص معًا).[6]

لقد اتضح أنَّ الافتراض الواسع الانتشار بين كتَّاب الخيال العلمي بأنَّ النجوم البعيدة لها كواكب في معظم الأحيان، صحيحٌ تمامًا بالرغم من أنه كان مثارًا للسخرية من قبل. فماذا عن فكرة أخرى في مجال الخيال العلمي ترتبط بذلك الافتراض: وجود أشكال فضائية أخرى من الحياة تتسم بالذكاء؟[7] تلك قضية أصعب كثيرًا، لكنه سيكون من الغريب للغاية أيضًا ألَّا ينتج كون يحتوي على الكنتيليونات من الكواكب، سوى كوكب «واحد» فقط يأهل بحياة ذكية. لا بد للكثير جدًّا من العوامل أن تتوازن بدقة لتجعل كوكبنا فريدًا.



على اليسار: منحنيات ضوء مجمعة لملايين من أحداث العبور، وتظهر فيها انخفاضات صغيرة عند نقطتي «تروجان» L4 وL5 (محددة بعلامات). وهي ليست بارزة إحصائيًّا. على اليمين: بيانات «مطوية» توضح منخفضًا بارزًا من الناحية الإحصائية.

في عام ١٩٥٩، نشر كلٌّ من جوزيبي كوكوني وفيليب موروني في مجلة «نيتشر» مقالًا مثيرًا بعنوان «البحث عن الاتصالات فيما بين النجوم». أشارا إلى أنَّ التلسكوبات الراديوية قد أصبحت حساسةً بما يكفي لالتقاط رسالة راديوية من حضارة فضائية. واقترحا أيضًا أنَّ الفضائيين سيختارون ترددًا من المعلمات: الخط HI في طيف الهيدروجين بتردد ١٤٢٠ ميجا هرتز. وهو معلم مميز لأنَّ الهيدروجين هو أكثر العناصر انتشارًا في الكون.

قرَّر عالم الفلك الراديوي فرانك دريك اختبار فكرة كوكوني وموريسون من خلال تدشين مشروع «أوزما»، الذي كان يبحث عن مثل تلك الإشارات من النجمين القريبين «إبسيلون إريداني» و«تاو سيتي». لم يكتشف دريك أية إشارات، لكنه نظَّم مؤتمرًا عام ١٩٦١ عن «البحث عن ذكاء خارج الأرض». في ذلك الاجتماع، كتب معادلة رياضية تعبِّر عن عدد الحضارات الفضائية الموجودة في مجرتنا التي يمكنها التواصل بالإشارات الراديوية في الوقت الحالي، وذلك نتيجة لسبعة عوامل، مثل متوسط معدل تكوُّن النجوم، ونسبة الكواكب التي تتطور عليها حياة، ومتوسط الوقت الذي تستغرقه الحضارات لإرسال إشارات راديوية يمكن اكتشافها.

غالبًا ما تُستخدم معادلة دريك لحساب عددٍ ما يوجد من حضارات فضائية قادرة على التواصل، لكنَّ ذلك لم يكن مقصد دريك منها. لقد كان يحاول عزل العوامل المهمة التي ينبغي على العلماء التركيز عليها. تنطوي معادلته على أخطاء عند تناولها حرفيًّا،

لكنَّ التفكير فيها يمدنا برؤًى ثاقبة بشأن احتمالية وجود حضارات فضائية واحتمالية اكتشافنا لإشاراتها. ومن المشاريع المهمة التي خلفت مشروع «أوزما»، مشروع «سيتي» SETI (البحث عن ذكاء خارج الأرض)، والذي تأسَّس في عام ١٩٨٤ على يد توماس بيرسون وجيل تارتر لقيادة بحث منهجي عن المراسلات الفضائية.

لا تُعد معادلة دريك عملية بدرجة كبيرة؛ لأنها شديدة الحساسية للأخطاء. فقد يكون المصطلح «كوكب» مقيِّدًا للغاية، مثلما سنرى بعد قليل. وقد يكون المصطلح «راديو» مقيِّدًا للغاية أيضًا. فربما يكون توقُّع تواصل الكائنات الفضائية بتقنية الراديو التي ولَّى زمانها عديم الفائدة كانتظار إشارات بالدخان. والأكثر من ذلك إثارةً للشك هو أننا سنتمكن من التعرُّف على مراسلاتهم على أنها مراسلات. فمع ظهور الأجهزة الإلكترونية الرقمية، صارت معظم إشاراتنا، حتى هواتفنا المحمولة، تخضع للتشفير الرقمي لضغط معلوماتها والحد من الأخطاء التي تسببها الضوضاء الخارجية. ومن المؤكد أنَّ الفضائيين سيقومون بالشيء نفسه. في عام ٢٠٠٠، أثبت كلٌّ من مايكل لاخمان، ومارك نيومان، وكريس مور، أنَّ المراسلات المشفرة بكفاءة تبدو كإشعاع الجسم الأسود تمامًا. أي طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر من جسم معتم غير عاكس عند درجة حرارة ثابتة. وكان العنوان الأصلي لهذه الورقة هو «إمكانية تمييز جميع المراسلات المتقدمة بالدرجة الكافية عن الضوضاء.»[8]

يطمح الذكاء إلى الأفضل. وحتى وجود حياة فضائية لا تتسم بالذكاء سيغير مسار الأمور.

عند تقييم احتمالات وجود حياة فضائية، من السهل جدًّا أن نقع في فخ تصور أنَّ المكان المثالي لوجود كائنات فضائية لا بد أن يكون كوكبًا شبيهًا بالأرض؛ أي أن يكون في حجم كوكبنا تقريبًا، ويقع على مسافة مشابهة من نجم مشابه، ويجب أن يجمع سطحه بين الأرض الصخرية والمياه السائلة (مثل كوكبنا)، وأن يحتوي غلافه الجوي على الأكسجين (مثلنا أيضًا). صحيح أنَّ الأرض هو الكوكب الوحيد المأهول الذي نعرف بوجوده، لكننا لم نبدأ البحث إلا الآن. تبدو جميع الكواكب الأخرى الموجودة في النظام الشمسي قاحلة وغير صالحة للحياة، وإن كان يجدر بنا ألا نتسرع في إصدار الحكم، مثلما سنرى لاحقًا. إذن؛ يبدو أن المكان الأنسب للبحث عن الحياة يقع خارج النظام الشمسي.

تتحسَّن احتمالية وجود حياة في مكان آخر بمبدأ حيوي أساسي، وهو أنَّ الحياة «تتكيف» مع الظروف السائدة. حتى على الأرض، تشغل الكائنات الحية تنوعًا مذهلًا من

المواطن: في أعماق المحيطات، وفي مرتفعات الغلاف الجوي، وفي المستنقعات، والصحاري، والينابيع التي تغلي مياهها، وتحت جليد القطب الجنوبي، وحتى على بُعد ثلاثة كيلومترات تحت الأرض. يبدو منطقيًّا إذن أن تشغل أشكال الحياة الفضائية نطاقًا أوسع كثيرًا من المواطن. ربما لا نستطيع «نحن» العيش هناك، لكنَّ البشر في حقيقة الأمر لا يستطيعون البقاء على قيد الحياة في معظم المواطن الأرضية دون مساعدة. فما يكون صالحًا للحياة يعتمد في حقيقة الأمر على ما يحيا فيه.

إنَّ مصطلحاتنا في حد ذاتها تكشف عن تحيزات عميقة. ففي السنوات الأخيرة، اكتشف علماء الأحياء نوعًا من البكتيريا يستطيع العيش في مياه تغلي، ونوعًا آخر يستطيع العيش في أجواء شديدة البرودة. يُسمى هذان النوعان معًا بالكائنات المحبة للظروف المتطرفة. وغالبًا ما تُصوَّر بأنها تتشبث على نحوٍ خطر ببيئة عدائية، مما يجعلها عرضة للانقراض في أي لحظة. والواقع أنَّ هذه الكائنات قد تكيفت مع بيئتها على نحو رائع، وستموت إذا انتقلت إلى بيئتنا. فمقارنةً بها، سنكون «نحن» الكائنات المحبة للظروف المتطرفة.[9]

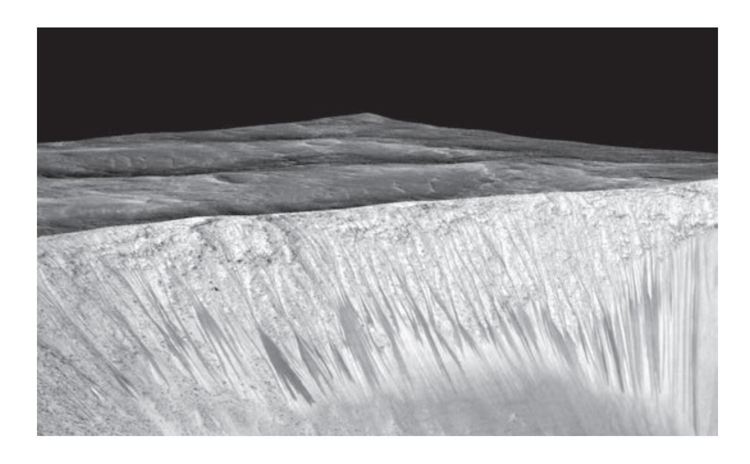
ترتبط جميع أشكال الحياة على الأرض بعضها ببعض؛ إذ يبدو أنها قد تطورت من نظام كيميائي حيوي بدائي واحد. وبهذا، فإنَّ «الحياة على الأرض» بجميع تنويعاتها الثرية تعود إلى نقطة بيانات «واحدة». يرى المبدأ الكوبرنيكي أنه ما من شيء شديد التميز بشأن البشر ولا بشأن بيئاتهم. وإذا كان هذا صحيحًا، فمن غير المرجَّح أن يكون كوكبنا مميزًا للغاية، لكنه لا يعني أيضًا أنه نموذجي دون شك. لقد صنع علماء الكيمياء الحيوية تنويعات غير اعتيادية من الجزيئات التي تشكل أساس الجينات الأرضية: جزيء الحمض النووي الريبوزي منقوص الأكسجين «دي إن إيه»، وجزيء الحمض النووي الريبوزي «آر إن إيه»، والأحماض الأمينية، والبروتينات، لمعرفةِ ما إذا كانت الجزيئات المستخدمة على الأرض وحدها هي التي تنجح. (وهي ليست كذلك.) كثيرًا ما تؤدي هذه الأسئلة إلى النمذجة الرياضية، إضافةً إلى علم الأحياء؛ لأننا لا نستطيع التيقن من أنَّ علم الأحياء في مكان آخر سيكون مطابقًا لما لدينا. فقد يستخدم كيمياء مختلفة، أو كيمياء مختلفة جذريًّا، أو لا تستخدم الكيمياء على الإطلاق بألا تكون جزيئية.

بالرغم من هذا، فمن المنطقي جدًّا أن «نبدأ» من نقطة البيانات الحقيقية الواحدة تلك، ما دمنا لا ننسى أنها خطوة واحدة أولى فحسب نحو احتمالات أكثر غرابة. ويؤدي ذلك بنا حتمًا إلى أحد الأهداف الوشيكة لصائدي الكواكب، وهو العثور على كوكب خارجي شبيه بالأرض.

تشهد دوائر الأحياء الفلكية اهتمامًا كبيرًا بما يُسمى «المنطقة الصالحة للحياة» حول النجم. ولا يشير هذا المصطلح إلى المنطقة التي يمكن أن تكون صالحة للحياة حول النجم. وإنما هي المنطقة المحيطة بالنجم والتي يمكن لنجم افتراضي يتسم بالضغط الجوي الكافي ليدعم وجود مياه سائلة. فحين تقترب للغاية من النجم تتحول المياه إلى بخار، وحين تبتعد للغاية تتحول المياه إلى جليد. وبين هذا وذاك، تكون درجة الحرارة «ملائمة بالضبط»، وقد اكتسبت هذه المنطقة في النهاية لقب «منطقة جولديلوكس».

توجد المنطقة الصالحة للحياة في النظام الشمسي بين ٠٫٧٣ وحدة فلكية من الشمس، و٣ وحدات فلكية من الشمس، غير أنَّ هذه الأعداد تقريبية والأعداد الدقيقة محل جدال. يلامس كوكب الزهرة الحافة الداخلية، وتمتد الحافة الخارجية بعيدًا حتى «سيريس»، بينما يقبع كوكب الأرض والمريخ في المنتصف. إذن، يمكن لسطحي الزهرة والمريخ «نظريًّا» أن يسمحا بوجود مياه سائلة. غير أنَّ الأمر أكثر تعقيدًا من الناحية العملية. فمتوسط درجة حرارة السطح على كوكب الزهرة ٤٦٢ درجة مئوية، وهي مرتفعة بما يكفي لصهر الرصاص؛ وذلك لأنَّ الزهرة يشهد درجة عالية للغاية من مفعول الدفيئة؛ إذ يحبس الحرارة في غلافه الجوي. ومن ثمَّ يبدو وجود المياه السائلة غير محتمل على الإطلاق على أقل تقدير. أما المريخ، فتبلغ درجة حرارته «سالب» ٦٣ درجة مئوية؛ لذا كان العلماء يعتقدون بصفة عامة أنَّ المريخ لا يتكوَّن إلا من جليد صلب. بالرغم من ذلك، فقد اكتشفوا عام ٢٠١٥، أنَّ كميات صغيرة من المياه قد ذابت في الصيف المريخي، وانحدرت على جوانب بعض الفُوَّهات. وقد كانوا يحتملون حدوث ذلك لبعض الوقت، بسبب ظهور شرائط داكنة، لكنَّ الدليل القاطع هو وجود أملاح مُمَيَّهة في الصيف، حين تزداد الشرائط طولًا. من المرجَّح أنَّ سطح المريخ كان يحتوي على الكثير من المياه قبل ٣٫٨ مليارات عام، لكنه فقد الكثير من غلافه الجوي بعد ذلك؛ إذ دفعته الرياح الشمسية بعيدًا حين ضعف المجال المغناطيسي للكوكب. تبخَّر جزء من المياه وتجمَّد الجزء الآخر. وهي تظل على هذا النحو في معظم الأحيان.

ليست المسافة من النجم الرئيسي هي المعيار الوحيد إذن وحسب. إنَّ مفهوم المنطقة الصالحة للحياة يوفر مبدأً توجيهيًّا بسيطًا ويمكن استيعابه، لكنَّ المبادئ التوجيهية ليست صارمة. فقد لا توجد المياه السائلة داخل المنطقة الصالحة للحياة، وتوجد خارجها. ذلك أنه إذا كان أحد الكواكب قريبًا للغاية من نجمه، فإنه يكون في منطقة شديدة الحرارة، لكن إذا كانت نسبة الرنين بين دورانه الذاتي ودورانه المداري ١:١، فإنَّ أحد



شرائط داكنة في فُوَّهة «جارني» على المريخ، وهي تظهر بسبب المياه السائلة.

جانبيه يواجه النجم على الدوام؛ لذا يكون ساخنًا للغاية، بينما يكون الجانب البعيد مفرط البرودة. وفي المنتصف، توجد منطقة معتدلة عند الزوايا القائمة على خط الاستواء. (يوجد جليد على عطارد الفائق الحرارة، مختبئًا في الفُوَّهات القطبية التي لا يتخللها ضوء الشمس أبدًا. بالرغم من عدم وجود رنين بنسبة ١:١.) وقد يكون لكوكب جليدي السطح مصدر داخلي للحرارة؛ فالأرض تضم مثل ذلك المصدر على أية حال، وهو يصهر بعضًا من الجليد. ووجود غلاف جوي سميك يحتوي على قدر كبير من ثاني أكسيد الكربون أو الميثان، سيدفئ الكوكب أيضًا. يمكن لتذبذب المحور أيضًا أن يساعد على بقاء الكوكب دافئًا خارج المنطقة الصالحة للحياة من خلال توزيع الحرارة دون تساوٍ. ويمكن لكوكب يتسم مداره بالانحراف المركزي أن يخزِّن الطاقة حين يكون قريبًا من نجمه، ويطلقها بينما يبتعد، حتى وإن لم يكن في المنطقة الصالحة للحياة في المتوسط. وقد يوجد نجم قزم أحمر بالقرب من كوكب له غلاف جوي غيمي سميك، مما يؤدي إلى توزيع الحرارة على نحوٍ أكثر توازُنًا.

في عام ٢٠١٣، اكتشف التلسكوب «كيبلر» كوكبين خارجيين كانا هما الأقرب شبهًا إلى الأرض حتى ذلك الوقت. يدور كلاهما بالنجم نفسه «كيبلر-٦٢» في كوكبة «القيثارة»، ويُعرفان باسم «كيبلر-٦٢ إي» و«كيبلر-٦٢ إف». يزيد قطر كلٍّ منهما عن قطر الأرض بمقدار ٥٠٪، قد يكونان من أمثلة كواكب الأرض الفائقة، وهي الأجسام الصخرية الأضخم من الأرض لكنها لا تصل إلى ضخامة نبتون. وربما أيضًا يتشكلان من الجليد المنضغط.

يقع كلاهما قَطعًا في منطقة «جولديلوكس» للنجم «كيبلر-٦٢»؛ لذا فمع توفُّر الظروف المناسبة في السطح مثل وجود غلاف جوي شبيه بغلافنا، يمكن أن توجد عليهما مياه سائلة.

في بداية عام ٢٠١٥، أعلنت ناسا اكتشاف كوكبين خارجيين جديدين يشبهان الأرض بدقة أكثر. أولهما «كيبلر ٤٣٨ بي»، وهو أكبر من الأرض بمقدار ١٢٪، ويستقبل من نجمه، الذي يقع على بُعد ٤٧٩ سنة ضوئية، طاقة أكثر بمقدار ٤٠٪. والنجم الثاني هو «كيبلر ٤٤٢ بي» الذي يزيد حجمه عن حجم الأرض بمقدار ٣٠٪ ويستقبل من نجمه، الذي يقع على بعد ١٢٩٢ سنة ضوئية، طاقةً أقل بمقدار ٣٠٪. لا يمكن تأكيد وجودهما من خلال الكشف عن الذبذبات المناظرة في نجومهما. وبدلًا من ذلك، يستخدم علماء الفلك مقارنات دقيقة للقياسات، والاستدلال الإحصائي. وهما من الكواكب الصخرية على الأرجح وفقًا لحجمهما، لكنَّ كتلتهما غير معروفة. وبما أنهما يدوران داخل المنطقة الصالحة للحياة، فقد يحتويان على مياه سائلة.

من بين الكواكب الخارجية الأخرى المؤكَّدة التي تشبه الأرض، «جليسي 667Cc» و«جليسي 832c» و«كيبلر 62e» و«كيبلر 452b» و«كيبلر 283c» ثمَّة مرشَّح آخر لم يتأكد وجوده بعد، هو «كيه أوه آي-٣٠١٠,٠١»، وهو شبيه بالأرض إذا كان موجودًا. يوجد الكثير من الكواكب التي تشبه كوكبنا، وهي ليست بعيدة للغاية بالمقاييس الكونية، لكننا لا نستطيع الوصول إليها بالتقنيات الحالية، أو تقنيات المستقبل القريب.

أعاد بيتر بهروزي ومولي بيبلز تأويل إحصائيات كواكب «كيبلر» الخارجية في سياق معرفتنا بكيفية ظهور النجوم في المجرات، وقد اشتقا صيغة لكيفية تغيُّر أعداد الكواكب في الكون مع مرور الوقت.[10] ويمكن استنتاج نسبة الكواكب الشبيهة بالأرض من هذا الرقم. فمن خلال تضمين العمر الحالي للكون، يتوصلان إلى أنَّ عدد الكواكب الشبيهة بالأرض يُقدَّر في الوقت الحالي بمائة كوادريليون كوكب. ومعنى هذا أنه يوجد ٥٠٠ مليون منها في كل مجرة؛ أي أنَّ مجرتنا تتضمن على الأرجح نصف مليار من الكواكب الشبيهة بكوكبنا.

إنَّ تركيز علم الأحياء الفلكي يتحول الآن من الكواكب الشبيهة بالأرض على نحو مباشر، إلى أنواع الكواكب الأخرى التي قد تدعم وجود حياة. ووفقًا لنماذج المحاكاة التي أجراها كلٌّ من ديميتار ساسيلوف، وديانا فالنسيا، وريتشارد أوكونيل، فإنَّ الكواكب من نوع الأرض الفائقة، يمكن أن تكون «أكثر» ملاءمةً للحياة من كوكبنا.[11] والسبب في ذلك

هو الصفائح التكتونية. فحركة قارات الأرض تساعد في الحفاظ على استقرار المناخ من خلال إعادة تدوير ثاني أكسيد الكربون عبر أرضية المحيط، والاندساس، والبراكين. تزيد احتمالية بقاء المياه السائلة إذا كان المناخ مستقرًّا، مما يمنح الحياة المستندة إلى المياه وقتًا أطول للتطور. يمكن للانجراف القاري إذن أن يحسِّن من صلاحية الكوكب للحياة.

وقد اكتشف فريق ساسيلوف، على عكس التوقعات، أنَّ الانجراف القاري شائع على الأرجح في أماكن أخرى، ويمكن أن يحدث على كواكب أكبر من الأرض. ستكون الصفائح أرق مما هي عليه هنا وتتحرك بسرعة أكبر. ومن ثمَّ؛ فسيكون مناخ الكواكب من نوع الأرض الفائقة أكثر استقرارًا من مناخنا، مما سيسهِّل عملية تطور حياة معقدة. إنَّ العدد المحتمل للكواكب الشبيهة بالأرض كبير للغاية، لكنَّ وجود مثل هذه الكواكب نادر نسبيًّا. بالرغم من ذلك، لا بد أنه يوجد الكثير جدًّا من كواكب الأرض الفائقة، مما يحسن احتمالية وجود حياة «شبيهة بالحياة الأرضية». انتهى أمر «الأرض النادرة». وعلاوةً على ذلك، ليست الأرض «مناسبة تمامًا» للصفائح التكتونية. لقد نجحنا في اللحاق بالحد الأدنى من نطاق الحجم الملائم بصعوبة بالغة.

يكفينا ذلك عن منطقة «جولديلوكس».

ربما لا تحتاج الحياة إلى كوكب على الإطلاق.

يجدر بنا ألا نيئس بشأن نظامنا النجمي بسهولة كبيرة. إذا كان ثمَّة وجود للحياة في مكان آخر بالنظام الشمسي، فأين ستوجد على الأرجح؟ إنَّ الكوكب الوحيد المأهول في المنطقة الصالحة للحياة حول الشمس، هو الأرض بحسب معرفتنا؛ لذا تبدو الإجابة للوهلة الأولى أنها «لا توجد في أي مكان.» والحق أنَّ الأماكن الأكثر ترجيحًا لوجود حياة عليها، وإن كان تعقيدها لا يزيد عن البكتيريا على الأرجح، لكنها حياة على أية حال، هي «أوروبا»، و«جانيميد» و«كاليستو» و«تيتان» و«إنسيلادوس». ويُعَد «سيريس» والمشتري احتمالَين مستبعدَين.

فالكوكب القزم، «سيريس»، يقع في الحافة الخارجية من المنطقة الصالحة للحياة، وغلافه الجوي رقيق ويحتوي على بخار الماء. وقد كشفت بعثة «دون» عن وجود بقع زاهية داخل إحدى فُوَّهاته، واعتقد العلماء في بادئ الأمر أنها جليد، لكنها تُعرف الآن بأنها نوع من ملح الماغنيسيوم. لو أنها كانت جليدًا بالفعل، لكان «سيريس» يحتوي على أحد المكوِّنات الأساسية للحياة الشبيهة بحياة الأرض، وإن كان متجمدًا. ومن المرجح وجود جليد على أعماق أبعد.

لقد اقترح كارل سيجان في ستينيات القرن العشرين، أنَّ الحياة البكتيرية، وربما كائنات أكثر تعقيدًا شبيهة بالبالونات، يمكن أن تطفو في الغلاف الجوي للمشتري. تتمثَّل العقبة الأساسية في أنَّ المشتري يطلق قدرًا كبيرًا من الإشعاع. بالرغم من ذلك، تنمو بعض أنواع البكتريا عاليًا في الغلاف الجوي للأرض حيث ترتفع مستويات الإشعاع، ويمكن لـ «بطيئات المشية»، وهي كائنات صغيرة تشتهر باسم «دببة الماء»، أن تحيا في مستويات متطرفة من الإشعاع ودرجات الحرارة الباردة والساخنة، والتي لا يمكننا العيش فيها.

إنَّ الأجرام الخمسة الأخرى التي ذكرتُها ليست كواكب ولا كواكب قزمة؛ بل أقمار، وهي تقع خارج المنطقة الصالحة للحياة. «أوروبا» و«جانيميد» و«كاليستو» من أقمار المشتري. مثلما ذكرنا في الفصل السابع، تحتوي هذه الأقمار على محيطات جوفية تشكلت؛ لأنَّ التسخين المدي الناتج عن المشتري يذيب الجليد. ومن المحتمل وجود فتحات حرارية مائية في قيعان هذه المحيطات؛ مما يوفِّر موطنًا لكائنات حية لا تختلف عمَّا يوجد في الفتحات المماثلة الموجودة في محيطات الأرض، كتلك الموجودة في سلسلة جبال الأطلنطي. ففي هذا المكان، تنفصل الصفائح التكتونية للأرض بعيدًا بعضها عن بعض، ويسحبها حزام نقل جيولوجي فتتقطع إربًا بينما تندس حوافها الخارجية تحت قارتي أوروبا وأمريكا. يمثل المزيج الغني من المواد الكيميائية البركانية، مع الدفء الصادر من الغازات البركانية الساخنة، موطنًا مريحًا للديدان الأنبوبية وأنواع الروبيان، وغير ذلك من الكائنات المعقدة نسبيًّا. إنَّ بعض علماء الأحياء التطورية يعتقدون أنَّ الحياة على الأرض قد نشأت بالقرب من تلك الفتحات. إذا حدث ذلك على الأرض، فلماذا لا يحدث على «أوروبا»؟

ما نناقشه تاليًا، هو القمر الأكثر غرابة من بينها على الإطلاق، وهو «تيتان» قمر زحل. يبلغ قطره نصف قطر قمر الأرض، وبخلاف أي قمر آخر في النظام الشمسي، يمتلك «تيتان» غلافًا جويًّا كثيفًا. يتكوَّن الجسم الأساسي لـ «تيتان» من خليط من الصخر والجليد المائي، وتبلغ درجة حرارة سطحه حوالي ٩٥ درجة كلفن تقريبًا (سالب ١٨٠ درجة مئوية). وقد اكتشفت بعثة «كاسيني» أنَّ به بحيراتٍ وأنهارًا من الميثان السائل والإيثان، وهما يوجدان على الأرض في صورة غازات في درجة حرارة الغرفة. يتكوَّن معظم الغلاف الجوي من النيتروجين (٩٨,٤٪)، زائد ١,٢٪ من الميثان، و٠,٢٪ من الهيدروجين، وبقايا من بعض الغازات الأخرى مثل الإيثان والأسيتلين والبروبان وسيناید الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون والأرجون والهيليوم.

العديد من هذه الجزيئات عضوي؛ أي أنَّ أساسها هو الكربون، وبعضها من الهيدروكربونات. يعتقد العلماء أنها تتكوَّن حين يفصل الضوء فوق البنفسجي الصادر من الشمس الميثان، ويشكِّل ضبابًا دخانيًّا كثيفًا برتقالي اللون. وذلك لغز في حد ذاته؛ إذ لا ينبغي أن يستغرق الأمر سوى ٥٠ مليون عامًا لكي ينفصل جميع الميثان الموجود في الغلاف الجوي، غير أنه لا يزال موجودًا. لا بد أنَّ شيئًا ما يجدده. فإمَّا أنَّ النشاط البركاني يطلق الميثان من مستودع جوفي ضخم، أو أنَّ الميثان الفائض ينتج عن كائن غريب وبدائي على الأرجح. إنَّ اختلال توازن الكيمياء علامة محتملة على وجود الحياة، والأكسجين الموجود على الأرض من الأمثلة الواضحة على ذلك؛ إذ كان سيختفي منذ فترة طويلة لولا عملية البناء الضوئي التي تقوم بها النباتات.

إذا كانت هناك حياة على القمر «تيتان»، فلا بد أنها تختلف جذريًّا عن الحياة الموجودة على الأرض. ليس المغزى الحقيقي من حكاية الروضة أنَّ تفضيل «جولديلوكس» كان «ملائمًا تمامًا»؛ بل إنَّ «الدبة الأم» و«الدب الأب» أرادا ما كان مناسبًا «لهما». إنَّ وجهة نظر الدببة هي ما يطرح الأسئلة العلمية الأكثر إثارة وأهمية. لا توجد مياه سائلة على «تيتان»، لكنه يحتوي على حصًى من الثلج. كثيرًا ما نفترض أنَّ الماء أساسي للحياة، لكنَّ علماء الأحياء الفلكية قد أرسوا أنَّ الأنظمة الشبيهة بالحياة يمكن أن توجد نظريًّا دون مياه.[12] فيمكن لكائنات «تيتان» أن تستخدم سائلًا آخر لتوصيل الجزيئات المهمة إلى أجسامها. يمثل الإيثان السائل أو الميثان السائل خيارين محتملين؛ فكلاهما يذيب العديد من المواد الكيميائية الأخرى. وقد يحصل كائن «تيتان» الافتراضي على طاقته من الهيدروجين من خلال تضمينه في تفاعل مع الأسيتلين، منتجًا بذلك الميثان.

يُعد ذلك مثالًا نموذجيًّا على «الكيمياء الفضائية الغريبة»؛ فالمسارات الكيميائية المحتملة في أشكال الحياة الفضائية، تختلف كثيرًا عن معيار الأرض. فهي توضح أنَّ الكائنات المحتملة لا يُشترَط أن تكون مشابهةً لتلك الموجودة على هذا الكوكب؛ مما يفتح مزيدًا من الاحتمالات التخيلية للحياة الفضائية. غير أنَّ الكيمياء وحدها لن تخلق الحياة. إنما يلزم لذلك عمليات كيميائية منظمة، والأرجح أن تجري في شيء مناظر للخلية. إنَّ خلايانا تُحاط بغشاء يتكوَّن من الشحوم الفوسفورية، وهي مركَّبات من الكربون والهيدروجين والأكسجين والفوسفور. وفي عام ٢٠١٥، قدَّم كلٌّ من جيمس ستيفينسون، وجوناثان لوناين، وبوليت كلانسي، نظيرًا لغشاء خلوي يؤدي وظائفه في الميثان السائل، وهو مصنوع من الكربون والهيدروجين والنيتروجين.[13]

إذا تطوَّر بشرٌ على المريخ، فكيف سيختلفون عنا؟

سؤال سخيف. فالبشر «لم» يتطوروا على المريخ. وإذا تطورت حياة على المريخ (ويُحتمَل أنها تطورت بالفعل قبل وقت طويل بحسب ما نعرفه، وربما لا تزال كائنات في مستوى البكتيريا تعيش هناك)، فإنها ستتبع مسارها التطوري الخاص، الذي سيكون مزيجًا من الصدفة والديناميكيات الانتقائية. إذا نقلنا البشر إلى المريخ، فسيموتون قبل أن يتمكنوا من التطور كي يتكيفوا مع الظروف الموجودة هناك.

حسن إذن. فلنفترض أنَّ كائنات فضائية قد تطورت على كوكب خارجي. ماذا سيكون شكلها؟ والحق أنَّ هذا السؤال ليس أكثر منطقية إلا بدرجة طفيفة. لتتذكر أنَّ الأرض تحفل بملايين الأنواع المختلفة. فما شكلها؟ بعضها يمتلك أجنحة، وبعضها يمتلك أرجلًا، وبعضها يمتلك الاثنين، وبعضها يعيش على بُعد كيلومترات في أعماق المحيطات، وبعضها يزدهر في الأماكن المتجمدة، وغيرها في الصحراء. فحتى الحياة الأرضية شديدة التنوع وتتسم بطبيعة حيوية غريبة؛ إذ تنقسم الخميرة إلى ٢٠ نوعًا جنسيًّا، وتأكل ضفادع «القيطم» صغارها.

عادةً ما تكون الكائنات الفضائية في الأفلام والعروض التليفزيونية شبيهة بالبشر؛ مما يسمح للممثلين بتصوير شخصياتها، أو تكون وحوشًا مولَّدة بالكمبيوتر بغرض خلق تأثير مرعب. غير أنَّ كلا التصورين لا يوفِّران دليلًا يمكن الاعتماد عليه لتخيل شكل الحياة الفضائية. فالحياة تتطور لتلائم الظروف السائدة والبيئة، وهي شديدة التنوع. يمكننا أن نخمِّن بالطبع، بالرغم من ذلك، فمن غير المحتمل أن يظهر «تصميم» محدَّد لكائن فضائي في أي مكان بالكون. والسبب في ذلك هو وجود تمييز جوهري في العلوم الفضائية قد أكَّد عليه جاك كوهين منذ فترة طويلة، وهو التفريق بين الكوني والمحدود.[14] يُستخدَم هذان المصطلحان في هذا السياق باعتبارهما من الأسماء لا الصفات، وهما اختصار لـ «السمات الشاملة/المحدودة». فالسمة المحدودة هي سمة خاصة تتطور بسبب حادثة تاريخية. فعلى سبيل المثال، يتقاطع مجرى الطعام لدى البشر مع مجرى الهواء؛ مما يسبب عددًا من حالات الوفاة في العام بسبب استنشاق الفول السوداني. إنَّ عدد الوفيات الناتج عن ذلك أصغر كثيرًا من أن يمحي التطور ذلك الخطأ في التصميم، وهو يعود إلى أحد أسلافنا السمكية التي كانت تعيش في الماء حيث لا يؤثر ذلك.

على العكس من ذلك، فالسمة الشاملة سمة عامة توفِّر مزايا واضحة للبقاء على قيد الحياة. ومن أمثلة ذلك، القدرة على اكتشاف الأصوات والضوء والقدرة على الطيران في

الغلاف الجوي. ومن علامات السمة الشاملة أن تكون قد تطورت بصفة مستقلة لمرات عديدة على الأرض. فالطيران على سبيل المثال قد تطوَّر في الحشرات والطيور والوطاويط، من خلال مسارات مستقلة. تختلف هذه المسارات في سماتها المحدودة؛ فجميعها يستخدم الأجنحة، لكنَّ تصميم الجناح يختلف للغاية في كل حالة من الحالات. بالرغم من ذلك، فقد اختيرت هذه التصميمات كلها لأداء السمة الشاملة الرديفة لها.

غير أنَّ هذا الاختبار ينطوي على عيب؛ فهو يربط السمة بالتاريخ التطوري للأرض على نحو مباشر. وليس ذلك جيدًا للغاية عند التفكير بشأن الكائنات الفضائية. فهل الذكاء في المستوى البشري (أو أعلى) سمة شاملة؟ لقد تطور الذكاء بصفة مستقلة في الدلافين والأخطبوطات على سبيل المثال، لكنه لم يصل إلى المستوى البشري؛ لذا فليس من الواضح ما إذا كان الذكاء يستوفي اختبار «التطور المتعدد» أم لا. بالرغم من ذلك، يبدو الذكاء بالفعل حيلة عامة «قد» تتطور بصفة مستقلة، وهي توفر مزايا واضحة قصيرة المدى للبقاء على قيد الحياة؛ مما يمنح مالكها ميزة يتفوق بها على بيئته. إذن يمكن القول بأنَّ الذكاء سمة شاملة.

ليست تلك بتعريفات، والفرق بين السمات الشاملة والمحدودة ضبابي على أفضل تقدير. غير أنه يركِّز الانتباه على ما سيكون عموميًّا على الأرجح، وما سيكون عرضيًّا إلى حد كبير. إذا وُجِدت حياة فضائية على وجه التحديد، قد تتسم ببعض السمات الشاملة الشبيهة بتلك الموجودة على الأرض، لكن من غير المرجح أن تتشارك معنا في أيٍّ من السمات المحددة. فالكائنات الفضائية الشبيهة بالبشر، والتي تتطور بصفة مستقلة على كوكب آخر، مثلنا تمامًا، ينبغي أن تتمتع بالكثير جدًّا من السمات المحددة كي يمكن الاقتناع بوجودها. المرفقان على سبيل المثال. غير أنَّ كائنات فضائية تمتلك طرفًا من نوعٍ ما، تستطيع تحريكه طوعًا، تستغل سمة شاملة.

إنَّ أي تصميم محدد للكائنات الفضائية سيكون مليئًا بالسمات المحددة. إذا كان مصممًا على نحو منطقي، فقد يكون «شبيهًا» بأحد أشكال الحياة الفعلية التي توجد في مكانٍ ما ذي بيئة مشابهة. سيتمتع أيضًا بسمات شاملة ملائمة. بالرغم من ذلك، فالاحتمال ضئيل بأن تظهر جميع السمات المحددة في الكائن الحقيقي نفسه. فلتصمِّم فراشةً ذات أجنحة فاخرة الألوان، وقرون استشعار دقيقة، وخطوط على الجسم. والآن، حاول أن تعثر على فراشة حقيقية تشبهها «تمامًا». ومن غير المرجح أن تجدها.

بما أننا نناقش احتمالات وجود حياة فضائية، فمن المنطقي أن نتساءل بشأنِ ما يمكن وصفه بأنه «حياة». إنَّ تحديد معنى المصطلح «حياة» يساعدنا أيضًا على تقليل

خطر استخدام السمات المحددة لتعريف الكائنات العالية التعقيد التي يُعد اعتبارها من الكائنات الحية أمرًا واضحًا. لتفادي هذا الخطر، علينا الالتزام بالسمات الشاملة. فالكيمياء الحيوية الأرضية على وجه التحديد، سمة محددة «على الأرجح». ذلك أنَّ التجارب توضح إمكانية وجود عدد لا يُحصى من التنويعات الصالحة للحياة من نظام البروتينات، والأحماض الأمينية، والحمض النووي الريبوزي المنقوص الأكسجين الخاص بنا، والذي نألفه. وإذا قابلنا كائنات فضائية قد طوَّرت حضارة مرتادة للفضاء، ولم تكن تمتلك الحمض النووي الريبوزي المنقوص الأكسجين، سيكون من الحمق الإصرار على أنها كائنات غير حية.

لقد استخدمت مصطلح «تحديد» لا «تعريف»؛ لأنه ليس من الواضح أنَّ «تعريف» الحياة يمكن أن يشكل أيَّ معنًى. يوجد الكثير جدًّا من المناطق الرمادية، وثمَّة استثناء لأي صيغة كلامية على الأرجح. فاللهيب يتسم بالكثير من خصائص الحياة، بما في ذلك القدرة على التكاثر، لكننا لا نَعده من الكائنات الحية. وهل الفيروسات كائنات حية أم لا؟ يتمثَّل الخطأ في أننا نتخيل وجود «شيء» نسميه بالحياة، وأنَّ علينا تحديد ماهية ذلك الشيء. غير أنَّ الحياة مفهوم استخلصتْه أدمغتنا من تعقيد ما يوجد حولنا، ونراه مهمًّا. إننا نستطيع اختيار ما تعنيه الكلمة.

معظم علماء الأحياء في الوقت الحالي تلقَّوا تدريبًا في الأحياء الجزيئية، وهم يفكرون تلقائيًّا في الجزيئات العضوية (ذات الأساس الكربوني). وقد أثبتوا براعة استثنائية في اكتشاف آلية عمل الحياة على هذا الكوكب؛ فلا غرو إذن أن يكون تصوُّرهم الافتراضي عن الحياة الفضائية شديد الشبه بما تبدو عليه الحياة هنا. بينما ينزع الرياضيون وعلماء الفيزياء إلى التفكير البنيوي. وما يهم بشأن الحياة من هذا المنظور، حتى وإن كانت الحياة على هذا الكوكب، ليس ما تتكوَّن منه. وإنما «الكيفية التي تتصرف بها.»

ابتكر ستيوارت كوفمان، وهو من مؤسسي نظرية التعقيد، إحدى الخصائص الأكثر شمولًا لـ «الحياة». فهو يستخدم مصطلحًا مختلفًا: العامل المستقل. وهو «شيء يستطيع استنساخ نفسه، والقيام بدورة عمل ديناميكية حرارية واحدة على الأقل.» ومثل جميع المحاولات، يهدف هذا التعريف إلى تلخيص السمات الأساسية التي تجعل الكائنات الحياة مميزة. وهو تعريف غير سيئ. فهو يركِّز على السلوك لا المكونات. ثم إنه يتفادى تعريف الحياة من خلال التركيز على حدودها الضبابية بدلًا من تحديد اختلافاتها المميزة عن معظم الأنظمة الأخرى.

إذا وجدنا شيئًا على كوكب آخر يتصرف كما تتصرف برامج الكمبيوتر، فلن نعلن أنه شكل من أشكال الحياة الفضائية. وإنما سنبحث عن الكائن الذي كتبه. أما إذا وجدنا شيئًا يستوفي شرطي كوفمان، فأعتقد أننا سنعده من الكائنات الحية على الأرجح.

وهو مثال قد حدث بالفعل.

فقبل عدة سنوات، صمَّمت أنا وكوهين أربع بيئات فضائية لمشروع متحف. وكان نموذج البيئة الأكثر غرابة، والتي سميناها «نيمبوس»، مصممًا إلى حدٍّ ما، على غرار «تَيتان». كان الوصف الأصلي يتضمن مقدارًا أكبر كثيرًا من التفاصيل، مثل التاريخ التطوري والهيكل الاجتماعي.

كان «نيمبوس» مثلما تخيلناه، قمرًا خارجيًّا له غلاف جوي كثيف من الميثان والأمونيا. ثمَّة طبقة سميكة من السحب تجعل السطح غائمًا للغاية. وتقوم كائنات «نيمبوس» الفضائية على أساس كيمياء السيليكون الفلزية؛ إذ تسمح بعض الذرات الفلزية من حين إلى آخر بأن يشكل السيليكون العمود الفقري لجزيئات كبيرة معقدة.[15] تأتي الفلزات من اصطدامات النيازك. وتضمنت أشكال الحياة البدائية، بُسُطًا شبه فلزية تتكوَّن من ألياف رقيقة تحمل تيارات كهربية ضعيفة. وكانت تتحرك باستخدام محالق. كانت الشبكات الصغيرة من المحالق تستطيع إجراء العمليات الحسابية، ثم تطورت لتصبح أكثر تعقيدًا. انقرضت هذه الكائنات البدائية قبل نصف مليار عام، لكنها تركت إرثًا: بيئة إلكترونية أساسها السيليكون.

أما اليوم، فالسمات الظاهرة الأكثر بروزًا هي قلاع خيالية: أنظمة معقَّدة من جدران سيليكونية فلزية متراكزة تقريبًا، وتضم بِركًا من الإيثان/الميثان. تمثِّل هذه البِرك أساسات لاستيلاد الرقائق، وهي كائنات إلكترونية نشأت من البُسُط. وهذه الرقائق هي قطع رفيعة مسطحة من صخور السيليكا، ومغطاة بدوائر إلكترونية سيليكونية فلزية. تخضع هذه الرقائق لسباقات تسلح تطورية معقدة، تستولي فيها على دوائر الرقائق الأخرى. وفي كثير من الأحيان، تظهر دوائر جديدة أفضل في الاستيلاء على الدوائر الأخرى. وقد صارت ماهرة في ذلك. ويتمثَّل جوهر تكاثرها في نسخ القالب. فالرقاقة المتحركة تطبع صورة كيميائية لدائرتها على صخرة بِكر. تُعد هذه الصخرة قالبًا تنمو عليه نسخة طبق الأصل من الدائرة. بعد ذلك، تنقسم الصخرة بفعل النسخة. تسمح أخطاء النسخ بحدوث الطفرات، ويؤدي الاستيلاء على الدوائر إلى توليفات جديدة للعناصر مما يقدم مزايا للبقاء في السباق المسلح.

حين يكتشف البشر «نيمبوس»، تبدأ بعض الرقائق في أن تصبح ثلاثية الأبعاد. وقد أصبحت تستخدم «هيكل فون نيومان»، وتتكاثر بهذه الحيلة الجديدة. فقرابة العام ١٩٥٠، قدَّم عالم الرياضيات، جون فون نيومان، فكرة إنسان آلي خلوي (وهي نوع من ألعاب الكمبيوتر الرياضية البسيطة)؛ لإثبات أنَّ وجود آلات ذاتية التكاثر أمرٌ ممكن نظريًّا.[16] يتضمن هذا الإنسان الآلي الخلوي ثلاثة مكونات: البيانات، وناسخ، وبانٍ. ينفِّذ الباني تعليمات مشفرة في البيانات لينتج بانيًا وناسخًا جديدين. بعد ذلك، يقوم الناسخ بنسخ البيانات القديمة، وتصبح لدينا نسخة ثانية. ينطبق الأمر نفسه على الدائرة النيمبوسية التي تتبع هيكل فون نيومان؛ إذ تنقسم إلى ثلاثة مكونات: بيانات وناسخ وبانٍ. يمكن للباني إنشاء الدوائر التي تحدِّدها البيانات. أما الناسخ فهو يقوم بالنسخ فحسب. وقد تطورت هذه القدرة جنبًا إلى جنب مع تطور نظام تناسلي ثلاثي الأجناس. يطبع والد نسخة من دائرة الباني الخاصة به على صخرة فارغة. بعد ذلك يمر والد آخر بالصخرة ويلاحظ الدائرة المطبوعة، ويضيف إليها نسخة من ناسخه. وأخيرًا، يساهم والد ثالث بنسخة من بياناته. والآن، يمكن لهذا الكائن الفون نيوماني الجديد أن ينطلق كرقاقة جديدة.

يُذاع أنَّ إحدى وصيفات الملكة فيكتوريا قد علَّقت على تمثيل سارة برنار لدور كليوباترا قائلة: «ما شدَّ اختلاف ذلك عن الحياة التي نحياها في بيوتنا، أيتها الملكة العزيزة.» والأمر نفسه ينطبق في هذه الحالة أيضًا؛ فلا يوجد أكسجين ولا مياه ولا كربون ولا منطقة صالحة للحياة ولا جينات، وثلاثة أجناس ... إنَّ ما يوجد يتسم بما يكفي من التعقيد ليُعدَّ شكلًا من أشكال الحياة، وإن كان غير تقليدي للغاية، وهو يستطيع التطور من خلال الانتقاء الطبيعي. غير أنَّ السمات الأساسية واقعية من الناحية العلمية.

لست أزعم أنَّ مثل هذه الكائنات توجد بالفعل، الحق أنه ما من تصميم «معيَّن» للحياة الفضائية من المرجَّح أن يوجد بالفعل؛ لأنه سيتضمن الكثير من السمات المحددة. غير أنها توضح التنوع الثري الذي تتسم به الاحتمالات الجديدة التي قد تتطور على كواكب شديدة الاختلاف عن كوكبنا.

الفصل الرابع عشر

نجوم مظلمة

«هولي: حسنًا، إنَّ صفة الثقب الأسود؛ أي سِمته الأساسية المميزة، هي أنه أسود. وصفة الفضاء أو لونه الأساسي، هو الأسود أيضًا. فكيف يُفترض بنا أن نراها؟»

مسلسل «ريد دوارف» (قزم أحمر)، الحلقة ٢: «ماروند»

لطالما كان السفر إلى القمر حلمًا من أحلام البشر. فنجد مجموعة «ترو فيكشينز» (قصص حقيقية)، التي ألَّفها الكاتب الساخر لوقيان السميسياطي، والتي يعود تاريخها إلى عام ١٥٠ قبل الميلاد، تتضمن رحلات تخيلية إلى القمر وكوكب الزهرة. وفي عام ١٦٠٨، كتب كيبلر رواية خيال علمي بعنوان «صومنيوم» (الحلم)، وفيها ترسل الشياطين صبيًّا من آيسلندا إلى القمر. وفي أواخر عشرينيات القرن السابع عشر، كتب فرانسيس جودوين، أسقف هيرفورد، «ذا مان إن ذا مون» (الرجل الموجود على القمر)، يطير فيها بجع عملاق بالبحار دومينيجو جونسيلز إلى القمر.

كانت شياطين كيبلر أفضل من الناحية العلمية من بجع جودوين. فالبجعة مهما بلغت قوَّتها لا تستطيع الطيران إلى القمر؛ لأنَّ الفضاء فراغ. أما الشياطين، فيمكنها أن تدفع إنسانًا مخدَّرًا دفعة قوية تكفي لإخراجه من الكوكب. ما مدى قوة هذه الدفعة؟ تبلغ الطاقة الحركية للصاروخ نصف كتلته مضروبًا في مربع سرعته المتَّجهة، ولا بد أن تتغلب على طاقة وضع أي مجال جذبوي تحاول الإفلات منه. كان كيبلر مدركًا لذلك وإن لم يَصغ الأمر بهذه الكلمات نفسها. لقد قال إنَّ الصاروخ لا بد أن يتخطى مقدارًا حرجًا من «سرعة الإفلات المتجهة». إذا دفعت شيئًا نحو السماء بسرعة أكبر، فلن يعود إليك، أما إذا دفعته بسرعة أقل، فسوف يعود. تبلغ سرعة الإفلات المتجهة للأرض ١١٫٢ كيلومترًا

في الثانية. وفي غياب أية أجسام أخرى، مع تجاهل مقاومة الهواء، سنحصل من ذلك على دفعة قوية بما يكفي للإفلات من الأرض إلى الأبد. ستظل «تشعر» بقوة الجاذبية، تذكَّر قانون الجذب «العام»، لكنَّ القوة ستنخفض بسرعة شديدة بما يتيح لك ألا تبطئ تدريجيًّا حتى تتوقف. وفي حالة وجود أجسام أخرى، ينبغي مراعاة تأثيرها الكلي أيضًا. إذا بدأت على الأرض وكنت ترغب في الإفلات من بئر جاذبية الشمس، فإنك تحتاج إلى سرعة متجهة بمقدار ٤٢٫١ كيلومترًا في الثانية.

توجد طرق للتغلب على هذا القيد. إنَّ حبل الفضاء ذا الكرات هو أداة افتراضية تدير مقصورة مثلما تدور إحدى المقصورات على شعاع العجلة الدوارة. إذا ركَّبت العديد منه معًا في شكل شلال، فسوف تتمكن من الركوب لتدور على مجموعة من أشعة العجلة الدوارة. والأفضل من ذلك أن تبني مصعدًا فضائيًّا، وهو في جوهره مجرد حبل يتدلى من قمر في مدار متزامن مع الأرض، وحينها يمكنك تسلُّق الحبل بأي درجة من البطء ترغب فيها. ذلك أنَّ سرعة الإفلات المتجهة لا تمثل أي أهمية في هذه الأساليب. فهي تنطبق على الأجسام الحرة الحركة التي تتلقى دفعة كبيرة ثم تُترك لحالها. وذلك يؤدي إلى نتائج أعمق كثيرًا لسرعة الإفلات المتجهة؛ إذ إنَّ أحد هذه الأجسام هو الفوتون: جسيم الضوء.

حين اكتشف رومر أنَّ للضوء سرعة محددة، أدرك قلة من العلماء ما ينطوي عليه ذلك، وهو أنَّ الضوء لا يستطيع الإفلات من جسم ضخم بما يكفي. وفي عام ١٧٨٣، تخيَّل جون ميشيل أنَّ الكون قد يكون ممتلئًا بأجسام ضخمة، أكبر من النجوم لكنها مظلمة. وفي عام ١٧٩٦، نشر لابلاس الفكرة نفسها في رائعة أعماله «عرض لنظام العالم»:

> إنَّ الأشعة الصادرة من نجم لامع كثافته مساوية لكثافة الأرض، ويبلغ قطره ٢٥٠ ضعفًا من قطر الشمس، لن تصلنا بسبب قوة جاذبيته؛ ومن ثمَّ فقد تكون أكبر الأجسام اللامعة في الكون غير مرئية لهذا السبب.

لقد حذف لابلاس هذه الفقرة بدايةً من الإصدار الثالث، وذلك بسبب ما كان ينتابه من شكوك فيها على الأرجح.

وإذا كان الحال كذلك؛ فما كان له أن يقلق حيالها، وإن استغرق الأمر قرنين من الزمان لإثبات وجود ما تنبأ به من «نجوم مظلمة». كانت النسبية قد أطاحت آنذاك بالأساس النيوتوني للحسابات، مما وضع مفهوم النجوم المظلمة تحت ضوء جديد، أو

ربما ظلام جديد. ذلك أنَّ حلول معادلات أينشتاين للمجال الخاص بالزمكان المحيط بكتلة كثيفة كبيرة للغاية تتنبأ بشيء أكثر غرابة حتى من نجوم ميشيل ولابلاس المظلمة. فمثل هذه الكتلة لا تحبس جميع الضوء الذي تصدره فحسب؛ بل تختفي من الكون تمامًا، مختبئة خلف تذكرة ذهاب فقط إلى عالم النسيان، تُدعى بأفق الحدث. في عام ١٩٦٤، كتبت الصحافية آن إيوينج، مقالًا عن هذه الفكرة بالعنوان اللافت للنظر، «ثقوب سوداء في الفضاء». استخدم الفيزيائي جون ويلر هذا المصطلح نفسه عام ١٩٦٧، وكثيرًا ما يُنسَب إليه الفضل في اختراعه.

إنَّ الوجود «الرياضي» للثقوب السوداء هو نتيجة مباشرة للنسبية العامة، غير أنَّ بعض العلماء كانوا يتساءلون عمَّا إن كان ذلك يعرِّض النظرية لعدم الاكتمال؛ إذ تفتقر إلى مبدأ فيزيائي إضافي ينفي مثل تلك الظاهرة الغريبة. والطريقة الأفضل لحل هذه المشكلة هي رصد ثقب أسود حقيقي. وقد ثبت أنَّ ذلك ليس بسهل، لا بسبب العبارة البارزة التي صرح بها الكمبيوتر هولي في البرنامج التلفزيوني البريطاني «ريد دوارف» فحسب، والتي اقتبستُها في افتتاحية الفصل. فحتى إذا كان الثقب الأسود غير مرئي، فإنَّ مجال جاذبيته سيؤثِّر في المادة التي تقع خارجه على نحو مميَّز. علاوةً على ذلك، تشير النسبية إلى أنَّ الثقوب السوداء ليست سوداء في الواقع (معذرةً هولي)، وهي ليست ثقوبًا بالضبط أيضًا. فالضوء لا يستطيع الخروج منها، لكنَّ المادة التي تُبتلَع «بداخلها» تنتج تأثيرات يمكن رصدها.

الآن، لم تَعد الثقوب السوداء مادةً للخيال العلمي. فمعظم علماء الفلك يقرون بوجودها. ويبدو بالفعل أنَّ معظم المجرات تحتوي على ثقب أسود فائق الضخامة في مركزها. وربما تكون هذه الثقوب السوداء هي سبب تكوُّن المجرات في المقام الأول.

لقد انبثقت نظرية الثقوب السوداء من اكتشافات رياضية في النسبية العامة؛ حيث تؤدي المادة إلى انحناء الزمكان، والزمكان المنحني يؤثِّر في الكيفية التي تتحرك بها المادة، وكل ذلك بما يتفق مع معادلات أينشتاين للمجال. يمثل أحد حلول المعادلات شكلًا هندسيًّا محتملًا للزمكان، إما في منطقة محددة من الكون أو في الكون بأكمله. من سوء الحظ أنَّ معادلات المجال معقدة، فهي أكثر تعقيدًا من الميكانيكا النيوتونية، والتي هي معقدة بما يكفي. قبل اختراع أجهزة الكمبيوتر السريعة، كانت الطريقة الوحيدة لإيجاد حلول معادلات المجال هي القلم الرصاص والأوراق و«الخلايا الرمادية الصغيرة» على حد قول

هركيول بوارو. وفي مثل هذه الظروف، يُعد التناظر من الحيل الرياضية المفيدة. إذا كان الحل المطلوب يتسم بالتناظر الكروي، فإنَّ المتغير الوحيد المهم هو نصف القطر. ومن ثمَّ؛ فبدلًا من تناول الأبعاد الثلاثة المعتادة للفضاء، لا يكون عليك سوى تناول واحد فقط، وذلك أسهل كثيرًا.

في عام ١٩١٥، استغل كارل شفارتزشيلد هذه الفكرة لحل معادلات أينشتاين لمجال جاذبية كرة ضخمة، تمثِّل نموذجًا لنجم كبير. وقد أدى الاختزال إلى متغير مكاني واحد إلى تبسيط المعادلات بالدرجة الكافية لاستنتاج صيغة مباشرة للشكل الهندسي للزمكان حول مثل هذه الكرة. كان شفارتزشيلد في الجيش البروسي في ذلك الوقت يحارب الروس، لكنه تمكَّن من إرسال اكتشافه إلى أينشتاين، طالبًا منه أن يرتِّب لأمر نشره. انبهر أينشتاين بالاكتشاف لكن شفارتزشيلد مات بعد ذلك بستة شهور إثر مرض لا علاج له من أمراض المناعة الذاتية.

من المباهج المنتشرة في الفيزياء الرياضية أنَّ المعادلات تبدو وكأنها تعرف في معظم الأحيان أكثر مما يعرفه مبتكروها. يضع المرء معادلات تستند إلى مبادئ فيزيائية يفهمها جيدًا. يتوصل بعد ذلك إلى حل، ويكتشف ما يشير إليه ذلك الحل، ثم يكتشف بعد ذلك أنه لا يفهم الإجابة. أو على وجه أكثر تحديدًا، يفهم المرء ما «هي» الإجابة، والسبب في أنها تحل المعادلة، لكنه لا يفهم السبب في تصرُّف الإجابة على ذلك النحو الذي تتصرف عليه تمام الفهم.

إنَّ ذلك بالمناسبة هو «الغرض» من المعادلات. لو كنا نستطيع تخمين الإجابات مقدمًا، لما احتجنا إلى المعادلات. لنتناول قانون نيوتن للجاذبية مثالًا. هل تستطيع أن تنظر إلى الصيغة وترى قطعًا ناقصًا؟ أنا شخصيًّا لا أستطيع.

وعلى أية حال، كانت نتائج شفارتزشيلد تتضمن مفاجأة كبيرة، وهي أنَّ حله تصرَّف على نحو غريب عند مسافة حرجة صارت تُعرف الآن باسم نصف قطر شفارتزشيلد. وينطوي الحل على متفردة بالفعل: بعض حدود الصيغة تصبح لا نهائية. فبداخل كرة يبلغ نصف قطرها تلك القيمة الحرجة، لا يخبرنا الحل بأي شيء منطقي عن الزمان أو المكان.

يبلغ نصف قطر شفارتزشيلد في حالة الشمس ثلاثة كيلومترات، بينما لا يبلغ في حالة الأرض سوى سنتيمتر واحد، وكلاهما مدفون على عمق لا يمكن الوصول إليه حيث لا يسبِّبان أية مشاكل، لكنهما غير متاحين للملاحظة أيضًا، مما يجعل من الصعب مقارنة إجابة شفارتزشيلد بالواقع، أو معرفة ما تعنيه. طرح هذا السلوك الغريب سؤالًا

جوهريًّا: ماذا سيحدث لنجم شديد الكثافة حتى إنه يقع داخل نصف قطر شفارتزشيلد الخاص به؟

في عام ١٩٢٢، اجتمع أبرز الفيزيائيين والرياضيين معًا لمناقشة ذلك السؤال ولم يتوصلوا إلى استنتاج واضح. كان الرأي العام هو أنَّ نجمًا كهذا سينهار تحت وطأة قوة جاذبيته. وما يحدث بعد ذلك يتوقف على تفاصيل الفيزياء، وكان ذلك في الوقت نفسه تخمينًا بصفة أساسية. بحلول العام ١٩٣٩، كان روبرت أوبنهايمر قد حسب أنَّ النجوم الضخمة بالدرجة الكافية ستخضع بالفعل إلى انهيار جذبوي في مثل هذه الظروف، لكنه اعتقد أنَّ نصف قطر شفارتزشيلد يحد منطقة من الزمكان يتوقف فيها الزمن تمامًا. أدَّى ذلك إلى اختراع مصطلح «النجم المتجمد». غير أنَّ ذلك التفسير كان يستند إلى افتراض خاطئ بشأن نطاق صلاحية حل شفارتزشيلد. والمقصود بذلك أنَّ للمتفردة معنًى فيزيائيًّا حقيقيًّا. فمن وجهة نظر ملاحظ خارجي، يتوقف الزمن بالفعل عند نصف قطر شفارتزشيلد. غير أنَّ ذلك ليس حقيقيًّا لملاحظ يعبر المتفردة. وتمثل ازدواجية وجهة النظر هذه إحدى الدعائم الأساسية في نظرية الثقوب السوداء.

في عام ١٩٢٤، أوضح آرثر إدينجتون أنَّ متفردة شفارتزشيلد هي أداة رياضية لا ظاهرة فيزيائية. فالرياضيون يمثلون الفضاءات المنحنية ومنحنيات الزمكان باستخدام شبكة من المنحنيات أو الأسطح تُمثل بالأعداد، كخطوط الطول والعرض على الأرض. تُعرف هذه الشبكات بأنظمة الإحداثيات. وقد أثبت إدينجتون أنَّ متفردة شفارتزشيلد سمة خاصة من اختياره من الإحداثيات. وبالمثل، تلتقي جميع خطوط الطول عند القطب الشمالي، بينما خطوط العرض دوائر صغيرة للغاية. بالرغم من ذلك، إذا وقفت عند القطب الشمالي، فإنَّ السطح يبدو بالشكل «الهندسي» نفسه الذي يبدو عليه في أي مكان آخر. ثلج وجليد فحسب. أما الشكل الهندسي الذي يبدو غريبًا بالقرب من القطب الشمالي، فيحدث بسبب اختيار إحداثيات تتمثَّل في الطول والعرض. فإذا استخدمت نظامًا إحداثيًّا يتمثَّل في قطب شرقي وآخر غربي على خط الاستواء، فسوف تتخذ هاتان النقطتان شكلًا غريبًا، بينما يتخذ القطبان الشمالي والجنوبي شكلهما المعتاد.

تمثل إحداثيات شفارتزشيلد ما يبدو عليه الثقب الأسود من الخارج، لكنه يختلف عن ذلك تمامًا من الداخل. لقد وجد إدينجتون نظام إحداثيات يؤدي إلى اختفاء متفردة شفارتزشيلد. ومن سوء الحظ أنه لم يواصل العمل على هذا الاكتشاف؛ إذ كان منشغلًا

بأسئلة فلكية أخرى؛ لذا لم يحظَ هذا الاكتشاف بالاهتمام بدرجة كبيرة. صار معروفًا على نطاق أكبر عام ١٩٣٣ حين أدرك جورج لومتر بصورة مستقلة أنَّ المتفردة التي ينطوي عليها حل شفارتزشيلد أداة رياضية.

وحتى مع هذا الاكتشاف، ظل الموضوع مهملًا حتى العام ١٩٥٨، حين وجد ديفيد فنكلشتاين نظامًا إحداثيًّا محسنًا؛ حيث يتخذ نصف قطر شفارتزشيلد معنًى فيزيائيًّا، لكنه يختلف عن المعنى المتمثل في تجمُّد الزمن هناك. وقد استخدم إحداثياته لحل معادلات المجال لا لمشاهد خارجي فحسب؛ بل لكامل مستقبل مشاهد داخلي. في هذه الإحداثيات، لا توجد متفردة في نصف قطر شفارتزشيلد. وبدلًا من ذلك، يتشكل «أفق الحدث»، وهو حاجز يسير في اتجاه واحد؛ إذ يمكن لخارجة أن يؤثِّر في داخله، لكنَّ العكس لا يحدث. يوضح هذا الحل أنَّ نجمًا يقع بداخل نصف قطر شفارتزشيلد الخاص به ينهار ليكون منطقة من الزمكان لا تستطيع المادة ولا حتى الفوتونات، الإفلات منها. ومثل هذه المنطقة منفصلة جزئيًّا عن بقية الكون؛ إذ يمكن الدخول إليها، لكنَّ الخروج منها محال. وهذا هو ما يمثله مصطلح الثقب الأسود بمعناه الحالي.

يتوقف شكل الثقب الأسود على الملاحظ. تخيَّل على سبيل المثال مركبة فضائية سيئة الحظ؛ بل الأدق أنَّ طاقمها هو السيئ الحظ، وتسقط هذه المركبة الفضائية في ثقب أسود. يُعد ذلك المثال من دعائم الخيال العلمي، لكنَّه نادرًا ما يُعالج على نحو صحيح ولو من بعيد. عالج فيلم «إنترستلار» (بين النجوم) هذا الأمر على النحو الصحيح بفضل مشورة كيب ثورن، غير أنَّ حبكته تتضمن عيوبًا أخرى. تخبرنا الفيزياء أننا إذا رأينا السفينة الفضائية الساقطة من بعيد، فإنها تبدو وكأنها تتحرك ببطء أكثر؛ لأنَّ جاذبية الثقب الأسود تشد الفوتونات الصادرة من السفينة الفضائية بقوة كبيرة للغاية. تلك الفوتونات القريبة من الثقب الأسود بالدرجة الكافية لا تستطيع الإفلات على الإطلاق، أما الفوتونات التي تقع خارج أفق الحدث حيث تلغي الجاذبية سرعة الضوء تمامًا، فيمكنها الإفلات لكن ببطء شديد للغاية. نرصد السفينة الفضائية بالكشف عن الضوء الذي تصدره؛ ومن ثمَّ نشاهده وهو يزحف إلى أن يتوقف دون أن يبلغ أفق الحدث أبدًا. تخبرنا النسبية العامة أنَّ الجاذبية تبطئ الزمن. وفي نصف قطر شفارتزشيلد، «يتوقف» الزمن، لكنَّ ذلك من وجهة نظر المشاهد الخارجي فحسب. أما الثقب نفسه، فيصبح أكثر احمرارًا بسبب تأثير دوبلر. وذلك هو السبب في أنَّ الثقوب السوداء ليست سوداء بالفعل، بالرغم من ملاحظة هولي الساخرة الشهيرة.

لا يختبر طاقم السفينة أيًّا من هذا. وإنما يندفعون باتجاه الثقب الأسود ويُبتلَعون فيه نحو أفق الحدث، وبعد ذلك …

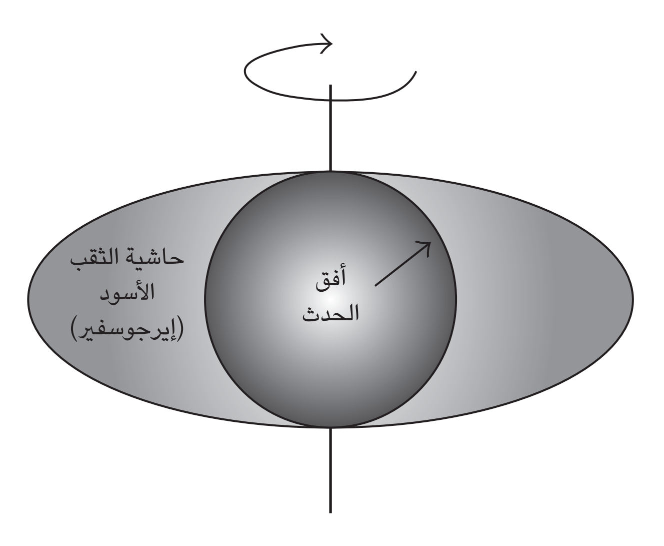
بعد ذلك يختبرون حل المعادلات مثلما تُرى من «داخل» الثقب الأسود. ربما يحدث ذلك. لا نستطيع أن نعرف على وجه اليقين لأنَّ المعادلات تقول إنَّ كل المادة الموجودة في السفينة الفضائية ستُضغَط إلى نقطة رياضية واحدة ذات كثافة لا نهائية بينما يبلغ حجمها صفرًا. إذا حدث ذلك في واقع الأمر، فإنه سيشكل متفردة فيزيائية حقيقية، وقاتلة بالطبع.

دائمًا ما يبدي علماء الفيزياء الرياضية ترددًا بشأن المتفردات. فحين تظهر متفردة، عادةً ما يعني ذلك أنَّ النموذج الرياضي يفقد اتصاله مع الواقع. وفي هذه الحالة، لا يمكننا إرسال مسبار إلى ثقب أسود ونخرجه مجددًا، أو حتى نستقبل منه إشارات راديوية (إذ إنها تتحرك بسرعة الضوء الذي لا يمكنه الإفلات هو أيضًا)؛ ومن ثمَّ فما من طريقة لمعرفة الواقع. بالرغم من ذلك، فمن المرجح أنَّ أيًّا كان ما سيحدث، سيكون عنيفًا للغاية ولن ينجو طاقم السفينة. إلا أن يكون ذلك في الأفلام. حسنًا، بعض الأطقم في بعض الأفلام.

خفية هي الطبيعة الرياضية للثقوب السوداء، وفي بادئ الأمر، كان النوع الوحيد من الثقوب السوداء الذي يمكن حل معادلات المجال الخاصة به بوضوح هو نوع فنكلشتاين، وهو نوع لا يدور وليس به مجال كهربي. عادةً ما يُسمى هذا النوع بثقب شفارتزشيلد الأسود. كان الفيزيائي الرياضي، مارتن كروسكال قد وجد حلًّا مشابهًا بالفعل، لكنه لم ينشره. بعد ذلك، طوَّر كروسكال وجورج سيكيريس هذا الحل إلى ما يُعرف الآن بإحداثيات كروسكال–سيكيريس، التي تصف باطن الثقب الأسود بقدر أكبر من التفصيل. إنَّ الشكل الهندسي الأساسي بسيط للغاية: أفق حدث كروي توجد نقطة المتفردة في مركزه. وكلُّ ما يسقط في الثقب الأسود يصل إلى المتفردة في فترة نهائية من الزمن.

يُعد هذا النوع من الثقوب السوداء مميزًا؛ لأنَّ معظم الأجرام السماوية تدور حول نفسها. وحين ينهار نجم دوَّار، فإنَّ حفظ الزخم الزاوي يقتضي أن يكون الثقب الأسود الناتج دوَّارًا هو أيضًا. في عام ١٩٦٣، توصَّل روي كير إلى حيلة رياضية بارعة وغير متوقعة من خلال تدوين مقياس زمكاني لثقب أسود دوَّار، وهو ما يُسمى بمقياس كير. ولَمَّا كانت معادلات المجال غير خطية، فالصيغة المباشرة لافتة للنظر. فهي توضح أنه

بدلًا من وجود أفق حدث كروي واحد، يوجد سطحان حرجان تتغير الخواص الفيزيائية عليهما بصورة درامية. السطح الداخلي هو أفق الحدث، ومثلما هي الحال في الثقب الأسود الساكن، فإنه يمثل حاجزًا لا يمكن للضوء عبوره. أما السطح الخارجي فهو شكل بيضاوي مسطح يلامس أفق الحدث عند القطبين.



أفق الحدث (كرة) والإيرجوسفير (شكل بيضاوي) لثقب أسود دوَّار.

تُسمى المنطقة التي تقع بينهما بحاشية الثقب الأسود أو الإيرجوسفير. وكلمة «إيرجون» هي المقابل اليوناني لمصطلح «العمل»، وقد نشأ المصطلح لأنك تستطيع استخلاص الطاقة من الثقب الأسود باستخدام هذه الحاشية. ذلك أنه إذا سقط جسيمٌ ما داخل هذه المنطقة، يحدث تأثير نسبوي يُسمى بتباطؤ الإطار المرجعي يؤدي إلى دورانه حول محوره مع الثقب الأسود؛ مما يزيد من طاقته. ولما كان الجسيم لا يزال خارج أفق الحدث، فهو يستطيع الإفلات تحت ظروف ملائمة آخِذًا معه تلك الطاقة. وبهذه الطريقة، يستخلص الطاقة، وهو ما لا يمكن تنفيذه مع ثقب أسود ساكن.

إضافةً إلى الدوران الذاتي، يمكن للثقب الأسود أن يمتلك شحنة كهربية. وقد وجد هانز رايسنر وجونار نوردستروم مقياسًا للثقب الأسود المشحون: مقياس رايسنر-نوردستروم. وفي عام ١٩٦٥ اكتشف إزرا نيومان مقياس الثقب الأسود الدوَّار

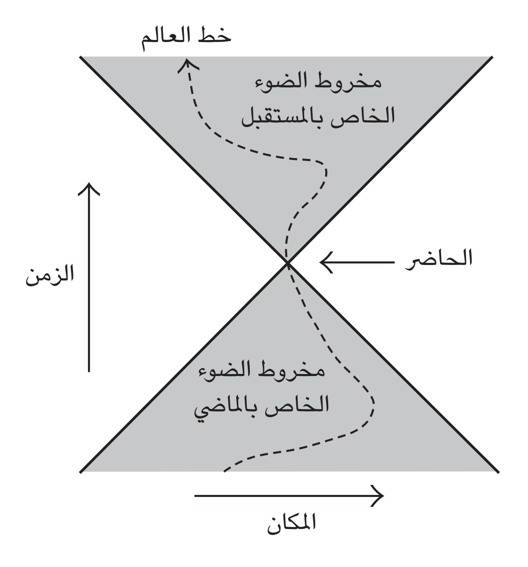
المشحون المتناظر محوريًّا، وهو ما يُعرف بمقياس كير-نيومان. ربما تعتقد أنه توجد أنواع أكثر تعقيدًا من الثقوب السوداء، لكنَّ الفيزيائيين لا يعتقدون ذلك، باستثناء نوع مغناطيسي قد يوجد. فحدسية انعدام الشعر تؤكد على أنَّه فور استقرار الثقب الأسود بعد انهياره المبدئي، ومع تجاهل التأثيرات الكمومية، لن يكون للثقب الأسود سوى ثلاث خواص فيزيائية أساسية: الكتلة والدوران الذاتي والشحنة. يأتي اسم الحدسية من العبارة: «ليس للثقوب السوداء شعر»، والتي وردت عام ١٩٧٣ في الكتاب المرجعي عن الموضوع: «الجاذبية»، من تأليف تشارلز ميزنر وكيب ثورن وجون ويلر. وقد نسب جون ويلر هذه العبارة إلى جيكوب بيكينشتاين.

غالبًا ما يُشار إلى هذه العبارة بـ «مبرهنة» انعدام الشعر، لكنها لم تُثْبَت حتى الآن، وهو ما تشير إليه هذه التسمية في المعتاد. والحق أنها لم تُدحض بعدُ أيضًا. أثبت ستيفن هوكينج وبراندون كارتر وديفيد روبينسون بعض الحالات الخاصة. وإذا كان من الممكن للثقوب السوداء أن تمتلك خاصية المجال المغناطيسي، فسينبغي تعديل الحدسية لتشمل تلك الاحتمالية أيضًا.

لنتناول جزءًا من الطبيعة الهندسية للثقوب السوداء كي ندرك مدى غرابة هذه البنى.

في عام ١٩٠٧، صمَّم هيرمان مينكوفسكي صورة هندسية بسيطة للزمكان النسبوي. وسوف أستخدم هنا صورة مبسطة تتضمن بُعدًا واحدًا للمكان، إضافةً إلى البُعد المعتاد للزمان، لكن من الممكن تعميم هذه الصورة لتعبر عن الحالة الفيزيائية الواقعية التي تتضمن ثلاثة أبعاد للمكان. في هذه الصورة، تمثِّل «خطوط العالم» المنحنية حركة الجسيمات. ومع تغير إحداثيات الزمن، يمكنك معرفة إحداثيات المكان التي ستنتج عن ذلك، من المنحنى. تمثِّل الخطوط التي تقع على المحاور بزاوية تبلغ ٤٥ درجة، الجسيمات التي تتحرك بسرعة الضوء. ومن ثمَّ؛ فلا يمكن لخطوط العالم أن تقطع أي خط بزاوية تبلغ ٤٥ درجة. ثمَّة نقطة في الزمكان تُسمى بالحدث هي التي تحدِّد هذين الخطين اللذين يكوِّنان معًا، مخروطها الضوئي. يضم هذا المخروط مثلثين يمثلان الماضي والمستقبل. أما الجزء المتبقي من الزمان، فلا يمكن بلوغه بدءًا من تلك النقطة، ولكي تبلغه سيكون عليك أن تتحرك أسرع من الضوء.

في هندسة إقليدس، نجد أنَّ التحولات الطبيعية حركات جامدة، وهي تحفظ «المسافات» بين النقاط. ويناظرها في النسبية الخاصة تحولات لورنتز، وهي تحفظ كمية تُدعى الفترة البينية. ووفقًا لمبرهنة فيثاغورس، فإنَّ مربع المسافة من المصدر إلى



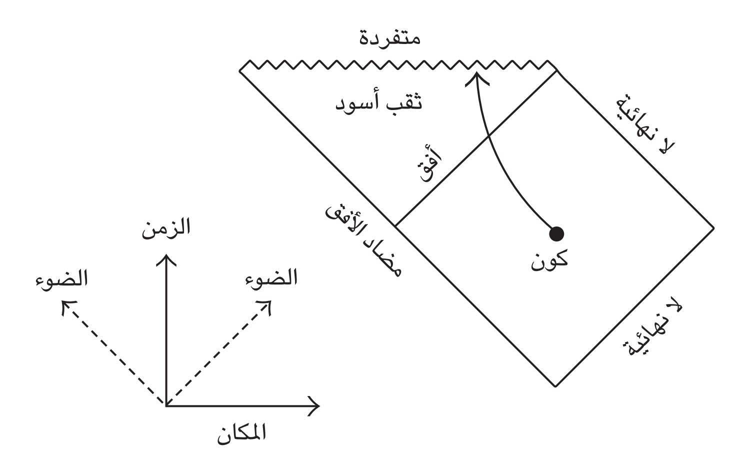
تمثيل مينكوفسكي للزمكان النسبوي.

نقطةٍ ما على أحد المستويات يساوي مجموع مربعي الإحداثيين الرأسي والأفقي. ومربع الفترة البينية يساوي مربع إحداثي المكان «ناقص» إحداثي الزمان.[1] نجد أنَّ هذا الفرق يساوي صفرًا عند الخطوط التي تقع بزاوية ٤٥ درجة، وهو يتخذ قيمة موجبة داخل المخروط الضوئي. إذن، فالفترة الفاصلة بين حدثين يرتبطان سببيًّا يساوي عددًا حقيقيًّا، مما يعكس استحالة السفر بينهما.

في النسبية العامة، تُضمَّن الجاذبية من خلال السماح لمستوى مينكوفسكي المسطح بالانثناء، مما يحاكي تأثير قوة الجاذبية، مثلما يتضح في الصورة الواردة بعنوان «تأثير الانحناء/الجاذبية على جزيء يمر بنجم أو كوكب».

ومن خلال إعادة صياغة شكل مينكوفسكي الهندسي بإحداثيات كروسكال-سيكيريس، طوَّر روجر بنروز طريقة رائعة البساطة لتصوير الهندسة النسبوية للثقوب السوداء.[2] تحدِّد صيغة المقياس هذه الهندسة على نحو ضمني، غير أنك قد تحدِّق في الصيغة إلى أن يضنيك التعب دون أن تصل إلى أي شيء. فلماذا لا نرسم بعض الصور بما أننا نرغب في معرفة النظام الهندسي؟ لا بد أن تكون الصور متسقة مع المقياس، لكنَّ صورة جيدة تساوي ألفًا من الحسابات.

تكشف صور بنروز عن بعض السمات الخفية لفيزياء الثقوب السوداء، مما يتيح عقد المقارنات بين الأنواع المختلفة من الثقوب السوداء. وهي تؤدي أيضًا إلى بعض الاحتمالات المدهشة، غير أنها تخمينية فحسب. مرةً أخرى، يُختزَل المكان إلى بُعد واحد (يُرسم أفقيًّا)، بينما يُرسم الزمن رأسيًّا، وتتحرك أشعة الضوء بزوايا تبلغ ٤٥ درجة لتكون مخاريط ضوئية تفصل بين الماضي والمستقبل؛ ومن ثمَّ فهي مناطق لا يمكن الوصول إليها.



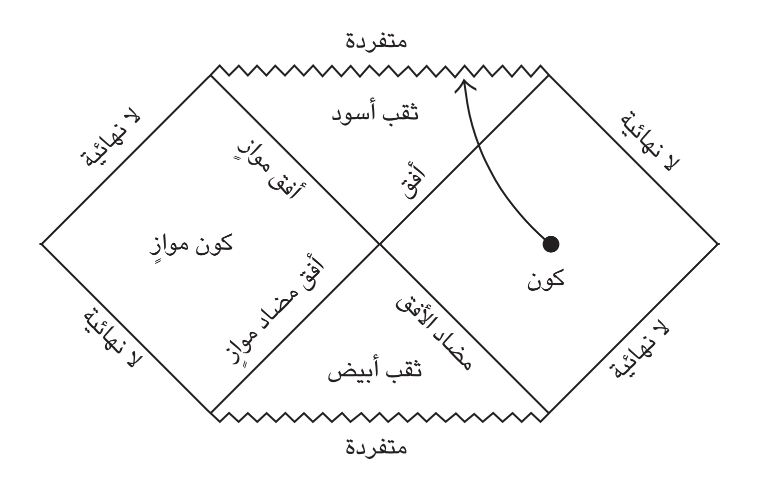
رسم بنروز التخطيطي للثقب الأسود من نوع شفارتزشيلد.

عادةً ما تُرسَم صورة مينكوفسكي على شكل مربع، لكنَّ رسم بنروز يستخدم الشكل الماسي بدلًا منه؛ وذلك للتأكيد على الطبيعة الخاصة للمنحدرات التي تبلغ ٤٥ درجة. يمثل كلا الشكلين طريقتين مختلفتين فحسب لضغط مستوًى لا نهائي في حيز مكاني محدَّد. وبالرغم من أنها نظم إحداثية غير معتادة، فهي مفيدة في حالة الزمكان.

لنبدأ على سبيل التمهيد بالنوع الأبسط، وهو ثقب شفارتزشيلد الأسود. ذلك أنَّ رسم بنروز الذي يمثله بسيط إلى حد كبير. فالشكل الماسي يمثل الكون، وهو يتبع بذلك نموذج مينكوفسكي. ويمثل السهم المنحني خط العالم للمركبة الفضائية التي تسقط في الثقب الأسود؛ إذ تعبر أفق «الحدث» وتصطدم بالمتفردة المركزية (الخط المتعرج). أما الآن، فيوجد أفق ثانٍ يُسمَّى «مضاد الأفق». فما ذلك؟

حين ناقشنا سقوط مركبة فضائية في ثقب أسود، اكتشفنا أنَّ هذه العملية تبدو من داخل المركبة مختلفة للغاية عمَّا تبدو عليه إذا كنت تشاهد من خارج الثقب الأسود. تتبع المركبة الفضائية مسارًا شبيهًا بالسهم المنحني في الصورة، وتنتقل عبر الأفق إلى المتفردة. لكن لأنَّ الضوء يفلت ببطء شديد للغاية مع اقتراب المركبة من الأفق، يرى المشاهد الخارجي مركبة فضائية شديدة الاحمرار، وتتباطأ تدريجيًّا إلى أن تتوقف. يحدث التغير في اللون بسبب الانزياح الأحمر الجذبوي؛ فمجالات الجاذبية تبطئ مرور الوقت مما يغيِّر تردد الموجات الكهرومغناطيسية. بعض الأجسام التي سقطت ستكون مرئية هي أيضًا في كل مرة ينظر فيها أحدهم. وفور أن يتوقف الزمن، تبدو أنها تظل على ذلك الحال.

يمثل الأفق الموضح في رسم بنروز أفق الحدث من منظور الطاقم. أما «مضاد الأفق»، فهو المكان الذي «تبدو» السفينة أنها تتوقف فيه من منظور مشاهد خارجي.



رسم بنروز لزوج يجمع بين ثقب أسود من نوع شفارتزشيلد وثقب أبيض.

الآن تصبح إحدى البنى الرياضية المثيرة للاهتمام ممكنة. فلنفترض أننا سنطرح السؤال التالي: ماذا يوجد على الجانب البعيد من مضاد الأفق؟ وفقًا للإطار المرجعي للطاقم، سيكون ذلك هو الجزء الداخلي للثقب الأسود. بالرغم من ذلك، يوجد امتداد رياضي طبيعي

لهندسة شفارتزشيلد، حيث توجد نسخة معكوسة الزمن من ثقب شفارتزشيلد الأسود، وهي مثبتة على النسخة المعتادة. من الناحية الرياضية، نثبت نسختين من المقياس معًا مع عكس الزمن في نسخة منها من خلال تدوير الصورة بمقدار ١٨٠ درجة، لكي نحصل على الصورة الكاملة.

يُعرف الثقب الأسود معكوس الزمن باسم الثقب الأبيض، وهو يتصرف كثقب أسود يدور الزمن فيه عكسيًّا. ففي حالة الثقب الأسود، تسقط المادة (والضوء) بداخله ولا تستطيع الخروج. أما في حالة الثقب الأبيض، فتسقط المادة (والضوء) إلى الخارج، ولا تستطيع الدخول. يصدر «الأفق الموازي» الضوء والمادة، لكنه يصبح غير نفَّاذ إلى أيهما حين يحاول دخول الثقب الأبيض.

عند تدوير صورة كوننا، نجد أنها تصف كونًا أيضًا، لكنه لا يرتبط بكوننا بعلاقة سببية؛ لأنَّ حد سرعة الضوء في النسبية يعني أنك لا تستطيع دخوله باتباع مسار أشد انحدارًا من ٤٥ درجة. من الناحية التخمينية يمكن أن تمثِّل الصورة الثانية كونًا مختلفًا تمامًا. فإذا دخلنا إلى عالم الخيال المحض، يمكن لتقنية متقدمة بالدرجة الكافية للسماح بالسفر بسرعة أكبر من الضوء، أن تعبر بين هذين الكونين مع تفادي المتفردات.

إذا اتصل ثقب أبيض بثقب أسود على نحوٍ يسمح للضوء والمادة والتأثيرات السببية بالعبور، فإننا نحصل على «ثقب دودي»، وهو من الطرق المحبوبة في كتب الخيال العلمي والأفلام للتغلب على حد السرعة الكوني، وإيصال الشخصيات إلى كواكب فضائية قبل أن يموتوا من كِبر السن. فالثقب الدودي هو طريق مختصر كوني بين أكوان مختلفة أو مناطق مختلفة من الكون نفسه. وبما أنَّ كلَّ ما يدخل الثقب الأسود يُحفظ كصورة مجمدة حين يُرى من منظور مشاهد خارجي، فإنَّ ثقبًا دوديًّا يُستخَدم باستمرار، سيبدو محاطًا بصور مجمدة محمرة لجميع المركبات التي دخلت فم ثقبه الأسود. وأنا لم أرَ ذلك في أيٍّ من أفلام الخيال العلمي.

في هذه الحالة، لا يكون الثقب الأسود والثقب الأبيض متصلين بذلك الشكل، لكنهما سيكونان كذلك في النوع التالي من الثقوب السوداء. وذلك هو نوع الثقب الأسود الدوَّار، أو الثقب الأسود من نوع كير، وهو غريب للغاية. سنبدأ بزوج يتمثَّل في ثقب أسود من نوع شفارتزشيلد وثقب أبيض، لكن من دون المتفردتين. بعد ذلك، نمدِّد منطقتي الثقب الأسود والثقب الأبيض ليكوِّنا شكلين ماسيين. بين هذين الشكلين الماسيين، نضع (على اليسار) شكلًا ماسيًّا جديدًا. يضم هذا الشكل الماسي الجديد، متفردة «رأسية»

وهي «مثبتة في المكان لكنها توجد على الوقت أيضًا». على أحد جانبي المتفردة (الجانب الأيمن في رسم بنروز)، توجد منطقة «ثقب دودي» تربط بين الثقبين الأسود والأبيض مع تفادي المتفردة. يؤدي اتباع المسار المتعرج عبر الثقب الدودي للانتقال من هذا الكون إلى كون جديد. وعلى الجانب الآخر من المتفردة (الأيسر)، يوجد كون مضاد: كون ممتلئ بمادة مضادة. وبالمثل نضيف شكلًا ماسيًّا آخر على اليمين يمثل ثقبًا دوديًّا موازيًا وكونًا مضادًّا.

ليست تلك سوى البداية فحسب. فالآن عليك أن تصنع كومة لا نهائية مرصوفة بهذه الأشكال الماسية. «يفض» هذا البناء، دوران الثقب الأسود، وينتج سلسلة لا نهائية من الثقوب الدودية التي تربط بين العديد من الأكوان المختلفة على نحوٍ لا نهائي.

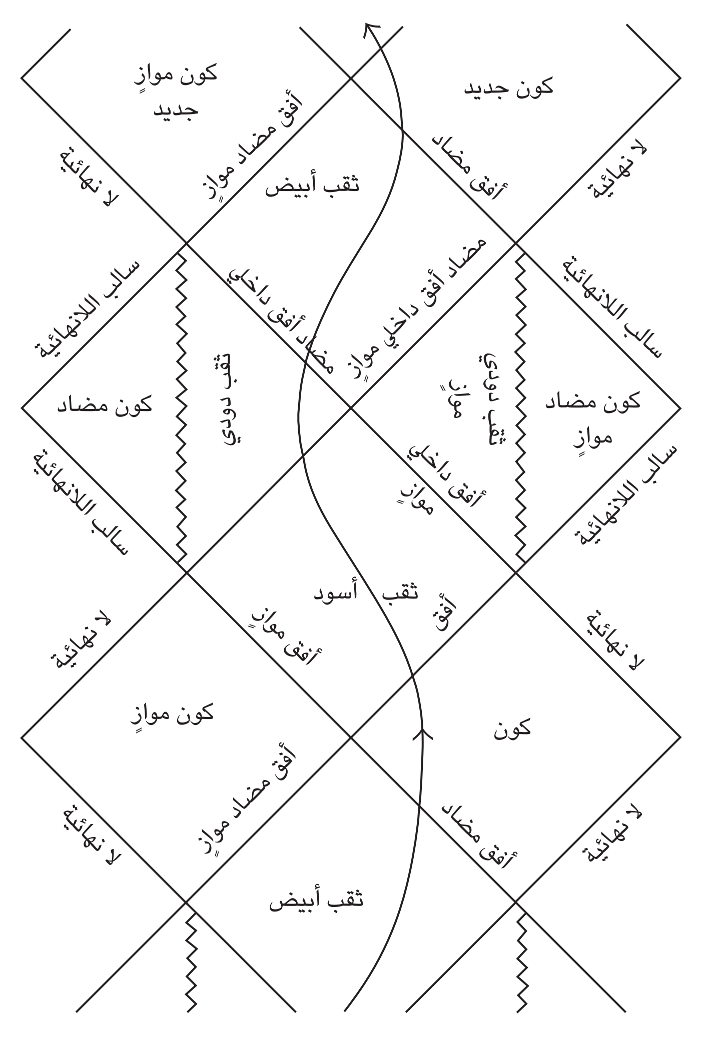
من الناحية الهندسية، لا تتمثَّل متفردة ثقب كير الأسود في شكل نقطة؛ بل حلقة دائرية. وبعبور هذه الحلقة، يمكن الانتقال بين كون وكون مضاد. غير أنَّ ذلك لن يكون تصرفًا حكيمًا على الأرجح، نظرًا لما تفعله المادة المضادة في المادة.

يتسم رسم بنروز لثقب أسود مشحون من نوع (رايستر–نوردستروم) بدرجة مماثلة من التعقيد، مع الاختلاف في بعض التأويلات. والرياضيات لا تعني أنَّ جميع هذه الظواهر الغريبة توجد بالفعل أو تحدث. وإنما تشير إلى أنها نتائج طبيعية للبناء الرياضي للثقب الأسود الدوَّار؛ فهي بُنًى زمكانية تتسق منطقيًّا مع الفيزياء المعروفة؛ ومن ثمَّ فهي نتائج منطقية لها.[3]

ذلك هو الشكل الذي تتخذه الثقوب السوداء هندسيًّا، لكن كيف يمكن أن تظهر في الواقع؟

يبدأ نجم ضخم في الانهيار تحت وطأة جاذبيته حين ينفد وقود التفاعلات النووية التي تؤدي إلى سطوعه. فكيف تتصرف المادة الموجودة بداخل النجم إذا حدث ذلك؟ لقد صارت هذه المشكلة أكثر تعقيدًا في الوقت الحالي بدرجة أكبر كثيرًا مما كانت عليه في وقت ميشل ولابلاس. لم تتغير النجوم، وإنما تغير فهمنا للمادة. فالأمر لا يقتصر على أنه يجدر بنا أخذ الجاذبية في الاعتبار (واستخدام النسبية لا قوانين نيوتن)؛ بل علينا أيضًا أن نتناول ميكانيكا الكم في التفاعلات النووية.

إذا أُرغِم عدد كبير من الذرات بفعل الجاذبية، على الاقتراب الشديد بعضها من بعض، فإنَّ مناطقها الخارجية التي تشغلها الإلكترونات، تحاول الاندماج. وثمَّة حقيقة كمومية نظرية، هي مبدأ باولي للاستبعاد، تشير إلى أنه لا يمكن لاثنين من الإلكترونات أن



رسم بنروز لثقب أسود دوَّار (كير).

يشغلا الحالة الكمومية نفسها. ولهذا؛ فمع زيادة الضغط، تنشد الإلكترونات أيَّ حالات شاغرة. وسرعان ما تكتظ معًا جنبًا إلى جنب، وكأنها كومة من البرتقال خارج متجر الخضراوات. حين تخلو الإلكترونات من الأماكن الشاغرة وتصبح الحالات الكمومية كلها مشغولة، تصبح هذه الإلكترونات مادة إلكترونية منحلة.

في عام ١٩٣١، استخدم سابرامانين تشاندراسخار حسابات نسبوية للتنبؤ بأنَّ جسمًا على درجة كافية من الضخامة، ويتكون من مادة إلكترونية منحلة، سينهار ولا بد تحت وطأة مجال جاذبيته ليكون نجمًا نيوترونيًّا؛ أي يتكوَّن بأكمله تقريبًا من النيوترونات. يمكن للنجم النيوتروني المعتاد أن يضغط ضعف كتلة الشمس في كرة يبلغ نصف قطرها ١٢ كيلومترًا. وإذا كانت الكتلة أصغر من ١٫٤٤ من كتلة الشمس، وهو رقم يُعرف بحد تشاندراسخار، يتشكل قزم أبيض لا نجم نيوتروني. وإذا كانت الكتلة أكبر من ذلك، لكنها أصغر من حد تولمان-أوبنهايمر-فولكوف، الذي يساوي ثلاثة أضعاف كتلة الشمس، فإنها تنهار لتشكل نجمًا نيوترونيًّا. في تلك المرحلة، يمنع ضغط التحلل النيوتروني إلى حدٍّ ما، حدوث المزيد من الانهيار الذي يؤدي إلى تشكُّل ثقب أسود، ولا يعرف علماء الفيزياء الفلكية النتيجة على وجه اليقين. بالرغم من ذلك، فإنَّ أي جسم تزيد كتلته عن ١٠ أضعاف كتلة الشمس، سيتغلب على الضغط ويصبح ثقبًا أسود. وأصغر كتلة رُصِدَت في الثقوب السوداء حتى الآن هي خمسة أضعاف كتلة الشمس.

يشير النموذج النسبوي المحض إلى أنَّ الثقب الأسود نفسه لا يصدر إشعاعًا؛ بل المادة المبتلعة وحدها هي التي يمكن أن تفعل ذلك؛ إذ إنها خارج أفق الحدث. بالرغم من ذلك، فقد أدرك هوكينج أنَّ التأثيرات الكمومية يمكن أن تؤدي بالثقب الأسود إلى أن يصدر إشعاعًا من أفق الحدث الخاص به. ذلك أنَّ ميكانيكا الكم تسمح بالتكوين المفاجئ لزوج يتألف من جسيم وجسيم مضاد، ما دام أحدهما سيُلغي الآخر بعد ذلك بفترة قصيرة للغاية. غير أنهما سيفعلان ذلك إلا أن يحدث ذلك خارج أفق الحدث تمامًا؛ إذ تسحب جاذبية الثقب الأسود أحد الجسيمين عبر أفق الحدث، بينما تترك (وفقًا لمبدأ حفظ الزخم) الجسيم الآخر بالخارج حيث يستطيع الإفلات تمامًا. ذلك هو إشعاع هوكينج الذي يؤدي إلى تلاشي الثقوب السوداء الصغيرة بسرعة كبيرة. تتلاشى الثقوب السوداء الكبيرة أيضًا، لكنَّ ذلك يستغرق فترات زمنية ضخمة.

لمعادلات المجال التي وضعها أينشتاين حلول رياضية بالثقوب السوداء، لكنَّ ذلك لا يضمن وجودها في الطبيعة. فربما توجد بعض القوانين الفيزيائية غير المعروفة، والتي تمنع وجود الثقوب السوداء. ولهذا فمن الأفضل أن نجد دليلًا رصديًّا على وجود الثقوب السوداء قبل أن ننجرف للغاية مع الرياضيات والفيزياء الفلكية. وسيكون من المذهل أن نذهب إلى أبعد من ذلك بحثًا عن الثقوب البيضاء والثقوب الدودية والأكوان البديلة، لكنَّ طموح الوصول إلى الثقوب السوداء يكفينا الآن.

ظلت الثقوب السوداء محض تخمين نظري في بادئ الأمر، ويستحيل رصدها مباشرة لأنَّ الإشعاع الوحيد الذي تصدره هو إشعاع هوكينج الضعيف. وإنما يُستدل على وجودها على نحوٍ غير مباشر، وغالبًا ما يحدث ذلك من خلال التفاعلات الجذبوية مع الأجسام الأخرى القريبة. وفي عام ١٩٦٤، كشفت آلة على أحد الصواريخ عن وجود مصدر قوي للغاية للأشعة السينية في كوكبة «سيجنوس»، ويُعرف هذا المصدر باسم «سيجنوس إكس-١». تنتشر كوكبة «سيجنوس»؛ أي الإوزة، على امتداد «الطريق اللبني»، وذلك بارز للغاية لأنَّ «سيجنوس إكس-١» يقع في قلب مجرتنا ولهذا يبدو لنا على أنه يقع بداخل «الطريق اللبني».

في عام ١٩٧٢، قام تشارلز بولتون ولويز ويبستر وبول موردين، بجمع ملاحظات من تلسكوبات بصرية وراديوية لإثبات أنَّ «سيجنوس إكس-١» هو جسم ثنائي.[4] يتمثَّل أحد مكونيه في النجم العملاق الفائق الأزرق «إتش دي إي ٢٢٦٨٦٨»، وهو مصدر الضوء المرئي. أما الجسم الآخر فلم يُكشَف عنه إلا من خلال انبعاثاته الراديوية، وهو يبلغ كتلة الشمس نفسها تقريبًا لكنه منضغط للغاية حتى إنه لا يمكن أن يكون نوعًا عاديًّا من النجوم. إنَّ كتلته التقديرية تتجاوز حد «تولمان-أوبنهايمر-فولكولف»؛ ومن ثَمَّ فهو ليس بنجم نيوتروني. وقد جعله هذا الدليل أول مرشح قوي ليكون من الثقوب السوداء. غير أنَّ النجم العملاق الفائق الأزرق ضخم للغاية حتى إنه لا يمكن تقدير مكوِّنه المضغوط بدقة. في عام ١٩٧٥، عقد ثورن وهوكينج رهانًا بشأن حالته، قال ثورن إنها ثقب أسود بينما قال هوكينج إنها ليست كذلك. وبعد مزيد من الملاحظات التي أُجريَت عام ١٩٩٠، أقرَّ هوكينج بالهزيمة وسدَّد الرهان بالرغم من أنَّ حالة الجسم لم تكن قد تأكدت على نحو قاطع بعد.

توجد المزيد من ثنائيات الأشعة السينية الواعدة، والتي يكون المكوِّن العادي فيها أقل ضخامة. أفضل الأمثلة على ذلك هو «في ٤٠٤ سيجني» V404 Cygni، الذي اكتُشِف عام ١٩٨٩، ويُعرَف الآن بأنه يقع على بُعد ٧٨٠٠ سنة ضوئية، بينما تبلغ كتلة المكوِّن المنضغط فيه ١٢ ضعفًا من كتلة الشمس؛ أي ما يزيد على حد «تولمان-أوبنهايمر-فولكوف». توجد أدلة داعمة أخرى؛ لذا فثمَّة اتفاق عام على أنه ثقب أسود. يكمل الجسمان دورة كل ستة أيام ونصف. تشوِّه جاذبية الثقب الأسود النجم إلى شكل البيضة؛ إذ تسرق مادته في تيار ثابت. وفي عام ٢٠١٥، بدأ «في ٤٠٤» في إصدار دفقات قصيرة من الضوء وأشعة سينية كثيفة، وهو ما حدث قبل ذلك في الأعوام ١٩٣٨، و١٩٥٦، و١٩٨٩. ويُعتَقد أنَّ السبب في ذلك هو مادة تتراكم حول الثقب الأسود الذي يبتلعها حين تتجاوز كتلتها قيمة حرجة.

جرى الكشف عن ثقوب سوداء أخرى من خلال الأشعة السينية التي تصدرها. فالغاز الساقط يشكِّل قرصًا رقيقًا يُسمى بقرص التراكم، وترتفع حرارة الغاز عندها بفعل الاحتكاك؛ إذ ينتقل الزخم الزاوي عبر القرص إلى الخارج. يمكن أن ترتفع حرارة الغاز بدرجة كبيرة حتى إنه ينتج أشعة سينية عالية النشاط، ويمكن أن يتحول ما يصل إلى ٤٠٪ منها إلى إشعاع. وكثيرًا ما تُنقَل الطاقة إلى قرص التراكم في نفثات ضخمة بزوايا قائمة.

ومن الاكتشافات الحديثة المذهلة أنَّ معظم المجرات الكبيرة بالدرجة الكافية، تحتوي على ثقب أسود مركزي عملاق تتراوح كتلته بين ١٠٠٠٠٠ شمس ومليار شمس. يمكن لهذه الثقوب السوداء الفائقة الضخامة أن تنظم المادة في المجرات. تحتوي مجرتنا على أحدها وهو مصدر الإشارات الراديوية؛ الثقب الأسود «ساجيتاريوس إيه*». في عام ١٩٧١، اقترح دونالد ليندن-بيل، ومارتن ريس، على نحوٍ تنبُّئِي بأنه قد يكون ثقبًا أسود فائق الضخامة. وفي عام ٢٠٠٥، اكتُشِف أنَّ مجرة «أندروميدا (إم ٣١)» تحتوي على ثقب أسود مركزي تتراوح كتلته بين ١١٠ ملايين شمس و٢٣٠ مليون شمس. ثمَّة مجرة أخرى تقع في جوارنا، هي المجرة «إم ٨٧» وتحتوي على ثقب أسود تبلغ كتلته ٦٫٤ مليارات شمس. أما المجرة البيضاوية الراديوية البعيدة «٠٤٠٢ + ٣٧٩»، فتحتوي على ثقبين أسودين فائقَي الضخامة يدور أحدهما بالآخر كنظام نجمي ثنائي عملاق؛ إذ يبعد أحدهما عن الآخر ٢٤ سنة ضوئية. يستغرق الأمر ١٥٠٠٠٠ عام كي يكملا دورة واحدة.

يقبَل معظم علماء الفلك أنَّ هذه الملاحظات توضِّح وجود الثقوب السوداء بالمعنى النسبوي المعتاد، لكن لا يوجد دليل حاسم على صحة هذا التفسير. وإنما هي أدلة ظرفية على أفضل تقدير، وفقًا للنظريات الحالية في الفيزياء الأساسية، حتى وإن كنا نعرف أنَّ النسبية وميكانيكا الكم رفيقتان غير متوافقتين، لا سيما حين نحتاج إلى استدعاء كلتيهما في الوقت نفسه، كما هي الحال في هذا المثال. وقد بدأ بعض الفيزيائيين المارقين يتساءلون عمَّا إذا كان ما نراه هو ثقوب سوداء «فعلًا»، أم أنه شيء آخر شديد الشبه بها. وهم يتساءلون أيضًا عمَّا إذا كان فهمنا النظري للثقوب السوداء يحتاج إلى إعادة التفكير أم لا.

يرى سمير ماثور أنَّ نموذج فيلم «بين النجوم» لا يفلح. لا يمكنك السقوط في ثقب أسود. وقد رأينا هذا؛ فالثقوب السوداء تصدر الإشعاع لأسباب كمومية، على العكس مما

كان العلماء يعتقدونه في بادئ الأمر. ذلك إشعاع هوكينج الذي يقول بسقوط أحد جسيمي زوج افتراضي عابر يتألف من جسيم وجسيم مضاد في الثقب الأسود بينما يفلت الآخر. يؤدي هذا التصوُّر إلى مفارقة المعلومات في الثقب الأسود؛ فالمعلومات تُحفَظ كالطاقة؛ ومن ثمَّ فلا يمكنها الاختفاء من الكون. يحل ماثور هذه المفارقة بطرح رؤية مختلفة للثقب الأسود، وهو أن يكون كرة من الوبر يمكن الالتصاق بها لكن لا يمكن اختراقها.

وفقًا لهذه النظرية، فإنك لن تسقط في الثقب الأسود إذا اصطدمت به. ما يحدث بدلًا من ذلك هو أنَّ المعلومات تتوزع في طبقة رقيقة على أفق الحدث، وتتحول أنت إلى صورة ثلاثية الأبعاد (هولوجرام). ليست هذه الفكرة بالجديدة، لكنَّ النسخة الأحدث منها تسمح للصورة الثلاثية الأبعاد بأن تكون نسخة غير تامة من الجسم الساقط. غير أنَّ هذا الطرح مثير للجدل، ويعود ذلك جزئيًّا إلى أنَّ ذلك المنطق نفسه يوضح أنَّ أفق الحدث جدار ناري عالي الطاقة، وأي شيء يصطدم به سوف يحترق. كرة وبرية أم جدار ناري؟ لا يزال هذا السؤال موضع جدل. فربما يكون الخياران من الخدع الناتجة عن نظام إحداثي غير ملائم، كوجهة النظر القائلة بأنَّ أفق الحدث يوقف الزمن، والتي فقدت مصداقيتها. ومن ناحية أخرى، لا يمكننا التمييز بين ما يراه مشاهد خارجي وبين ما يراه مشاهد ساقط، إذا لم يكن لأي جسم أن يسقط.

في عام ٢٠٠٢، تحدَّى إميل موتولا وباول مازور الرأي السائد بشأن النجوم المنهارة. فقد اقترحا أنَّها يمكن ألا تصبح ثقوبًا سوداء؛ بل تتحول إلى نجم جرافاستار، وهو فقاعة افتراضية غريبة تتكوَّن من مادة شديدة الكثافة.[5] سيبدو نجم الجرافاستار من الخارج شبيهًا للغاية بالثقب الأسود التقليدي. غير أنَّ الجزء المناظِر لأفق الحدث فيه، هو غلاف بارد كثيف يكون الفضاء مرنًا بداخله. لا يزال هذا الاقتراح خلافيًّا، ولم يُحسم فيه العديد من المسائل الغامضة بعد، مثل الكيفية المحدَّدة التي يتكوَّن بها مثل ذلك الشيء، لكنه مثير للاهتمام.

جاءت النظرية من إعادة فحص التصور النسبوي لثقب أسود في ضوء ميكانيكا الكم. تتجاهل المعالجة المعتادة هذه التأثيرات، لكنَّ ذلك يؤدي إلى أوجه شذوذ غريبة. فمحتوى معلومات ثقب أسود على سبيل المثال، أكبر كثيرًا من محتوى معلومات نجم قد انهار، لكنَّ المعلومات ينبغي أن تُحفَظ. وينبغي أن يكتسب الفوتون الساقط في ثقب أسود مقدارًا لا نهائيًّا من الطاقة حين يلتقي بالمتفردة المركزية.

ولَّما حيرت هذه المسائل موتولا ومازور، فقد تساءلا عمَّا إذا كان يمكن حلها بالمعالجة الكمومية. حين يقرب نجم منهار من تكوين أفق الحدث، يشكِّل مجالًا جذبويًّا ضخمًا.

يؤدي هذا إلى اضطراب التقلبات الكمومية للزمكان، مما يؤدي إلى نوع مختلف من الحالات الكمومية تشبه «ذرة فائقة» عملاقة (المصطلح التقني: تكاثف بوز-أينشتاين). يعبِّر هذا المصطلح عن مجموعة من الذرات المتطابقة التي توجد في الحالة الكمومية نفسها، وفي درجة حرارة تقترب من الصفر المطلق. يصبح أفق الحدث غلافًا رقيقًا من الطاقة الجذبوية، كموجة صدمية في الزمكان. يبذل هذا الغلاف ضغطًا سالبًا (أي إنه في الاتجاه الخارجي)؛ ومن ثمَّ فإنَّ المادة التي تسقط داخله ستستدير وترتفع مرة أخرى لتصطدم بالغلاف. بالرغم من ذلك، سيظل يبتلع المادة الساقطة من الخارج.

إنَّ نجوم الجرافاستار منطقية من الناحية الرياضية؛ فهي حلول ثابتة لمعادلات المجال لأينشتاين. وهي تتفادى مفارقة المعلومات. فمن الناحية الفيزيائية، نجد أنها تختلف اختلافًا ملحوظًا عن الثقوب السوداء، لكنها تشبهها تمامًا من الخارج في الوقت نفسه: مقياس شفارتزشيلد الخارجي. لنفترض أنَّ نجمًا تبلغ كتلته ٥٠ ضعفًا من كتلة الشمس قد انهار. في النظرية التقليدية، سنحصل من ذلك على ثقب أسود يمتد قطره إلى ٣٠٠ كيلومتر سيصدر إشعاع هوكينج. أما في النظرية البديلة، فسوف نحصل على نجم جرافاستار بالحجم نفسه، لكن سمك طبقته الخارجية يساوي $١٠^{-٣٥}$ فحسب، وتبلغ درجة حرارته ١٠ أجزاء من المليار درجة كلفن، ولا يصدر أي إشعاع على الإطلاق. (ستسعد هولي بذلك.)

توفِّر نجوم الجرافاستار تفسيرًا محتملًا لظاهرة أخرى محيِّرة أيضًا، وهي انفجارات أشعة جاما. ففي كثير من الأحيان تضيء السماء بوميض من أشعة جاما العالية الطاقة. وتتمثَّل النظرية المعتادة لتفسير هذه الظاهرة في أنَّ هذه الانفجارات نجوم نيوترونية متصادمة أو ثقوب سوداء تكوَّنت خلال مستعر أعظم. ويمثِّل ميلاد نجم جرافاستار أحد الاحتمالات الأخرى. فعلى نحو أكثر تخمينًا، سيكون باطن نجم جرافاستار بحجم كوننا عرضة هو أيضًا للضغط السالب الذي سيؤدي إلى تسارع المادة باتجاه أفق الحدث الخاص به؛ أي بعيدًا عن المركز. تشير الحسابات إلى أنَّ ذلك سيكون بحجم التمدد المتسارع للكون، والذي يُعزى عادةً إلى الطاقة المظلمة. ربما يقع كوننا في حقيقة الأمر داخل نجم جرافاستار ضخم.

من بين تنبؤات أينشتاين قبل ما يزيد على قرن من الزمان، وجود الموجات الثقالية التي تشكِّل في الزمكان تموجات كتلك التي تتشكَّل في البحيرات. إذا كان ثمَّة جسمان ضخمان، كالثقوب السوداء مثلًا، يدوران بسرعةٍ كلٌّ منهما حول الآخر، فإنهما يؤديان إلى

اضطراب البحيرة الكونية ويخلقان موجات يمكن الكشف عنها. وفي فبراير عام ٢٠١٦، أعلن «مرصد الأمواج الثقالية بالتداخل الليزري» (ليجو) عن اكتشاف أمواج ثقالية نتجت عن اتحاد اثنين من الثقوب السوداء. تمثل المعدات التي استخدمها هذا المرصد في زوج من الأنابيب التي يبلغ طولها أربعة كيلومترات وتتخذ شكل الحرف L. تتقافز أشعة الليزر ذهابًا وإيابًا في الأنابيب، وتتداخل أنماط أمواجها بعضها مع بعض عند نقطة التقاء الشكل L. إذا مرَّت موجة ثقالية، فإنَّ أطوال الأنابيب تتغير على نحو طفيف مما يؤثِّر في نمط التداخل. يمكن للجهاز أن يكشف عن حركة بحجم جزء واحد على الألف من عرض البروتون.

تتطابق الإشارة التي التقطها مرصد «ليجو» مع التنبؤات النسبوية لتصادم متصاعد بين ثقبين أسودين، تبلغ كتلة أحدهما ٢٩ ضعفًا من كتلة الشمس، بينما تبلغ كتلة الآخر ٣٦ ضعفًا من كتلة الشمس. ويفتح هذا الإنجاز حقبة جديدة في علم الفلك؛ فمرصد «ليجو» هو أول منظار جذبوي؛ أي أنه يرصد الكون باستخدام الجاذبية لا الضوء.

إنَّ هذا الاكتشاف الثقالي البارز لا يقدِّم معلومات عن السمات الكمومية الأكثر إثارة للجدل والتي تميز الثقوب السوداء التقليدية عن البدائل الافتراضية كالكرات الوبرية والجدران النارية ونجوم الجرافاستار. بالرغم من ذلك، سيتمكن خلفاؤه السابحون في الفضاء من اكتشاف تصادمات الثقوب السوداء؛ بل سيتمكنون من اكتشاف ظواهر أقل عنفًا كاتحاد النجوم النيوترونية، وسيساعدنا ذلك على حل هذه الألغاز. وفي هذه الأثناء، كشف «ليجو» عن لغز جديد: انفجار قصير لأشعة جاما يبدو مرتبطًا بالموجة الثقالية. غير أنَّ النظريات السائدة عن الثقوب السوداء لا تتنبأ بذلك.

لقد ألفنا وجود الثقوب السوداء، لكنها تشغل عالمًا تتداخل فيه النسبية مع ميكانيكا الكم ويتصارعان. ونحن لا نعرف في حقيقة الأمر أيُّ النظريات الفيزيائية ينبغي علينا استخدامها؛ لذا يبذل علماء الكون قصارى جهدهم في استخدام المتاح. لم تصدر الكلمة الأخيرة بشأن الثقوب السوداء بعدُ، وما من سبب يدعو للافتراض بأنَّ فهمنا الحالي مكتمل أو صحيح.

الفصل الخامس عشر

خصلات وفراغات

«علاوةً على ذلك، لا بد أن تكون السماء كروية؛ فذلك هو الشكل الوحيد الجدير بجوهرها لَمَّا كانت تحتل المكانة الأولى في الطبيعة.»

أرسطو، «عن السماء»

كيف يبدو الكون؟ وما مدى ضخامته؟ وما شكله؟

إننا نعرف شيئًا عن السؤال الأول، وهو ليس ما توقَّعه معظم علماء الفلك والفيزيائيين في بادئ الأمر. على أكبر النطاقات التي يمكننا رصدها، يبدو الكون كالرغوة في إناء الغسيل. تمثِّل فقاعات الرغوة فراغات ضخمة ليس بها شيء من المادة تقريبًا. أما أغشية الصابون المحيطة بالفقاعات، فهي أماكن تجمع النجوم والمجرات.

مما يبعث على الإحراج أنَّ نموذجنا الرياضي المفضَّل للتركيب المكاني للكون يفترض أنَّ المادة موزعة بالتساوي. يعزِّي علماء الكون أنفسهم بأنه على النطاقات الأكبر حتى مما نرصده، لا يعود تمييز الفقاعات الفردية ممكنًا، وتبدو الرغوة ملساء للغاية، لكننا لا نعرف أنَّ المادة في الكون تتصرف على هذا النحو. ففي كل المرات التي رصدنا فيها الكون على نطاق أكبر حتى الآن، كنا نجد تكتلات أكبر وفراغات. ربما لا يكون الكون متساويًا على الإطلاق. ربما يتخذ الكون شكلًا كسيريًّا، وهو شكل يتسم ببُنًى تفصيلية على جميع النطاقات.

لدينا بعض الأفكار أيضًا عن السؤال الثاني المتعلق بالحجم. فليست النجوم به نصف كروية منصوبة فوق الأرض، مثلما اعتقدت بعض الحضارات القديمة، ومثلما يبدو أنَّ «سفر التكوين» يفترض أيضًا. إنها بوابة إلى عالم شديد الاتساع حتى إنه يبدو لا نهائيًّا. وربما «يكون» لا نهائيًّا بالفعل. فهذا ما يعتقده معظم علماء الكون، لكن من

الصعب أن نتخيل الكيفية التي يمكننا أن نختبر بها هذا الزعم على نحوٍ علمي. إننا نعرف إلى حدٍّ ما، مدى ضخامة الكون المرصود، لكن كيف يمكننا أن نبدأ حتى بمعرفة ذلك؟

أما السؤال الثالث المتعلق بالشكل، فهو أكثر صعوبة من سابقيه. وما من اتفاق تام على الإجابة حتى الآن، وإن كان الإجماع على المنافس الأكثر اعتيادية؛ كرة. لطالما وُجِدَت تلك النزعة للاعتقاد بأنَّ الكون كروي، وأنه الجزء الداخلي من كرة ضخمة من الفضاء والمادة. بالرغم من ذلك، فقد اعتقد البشر في أوقات حديثة متعددة بأنه حلزوني الشكل، أو على شكل كعكة حلقية (دونَت)، أو كرة قدم، أو على شكل لا ينتمي إلى الهندسة الإقليدية يُدعى بوق بيكارد. قد يكون مسطحًا، أو منحنيًا. وإذا كان منحنيًا، فقد يكون انحناؤه موجبًا أو سالبًا أو يختلف من مكان إلى مكان. قد يكون نهائيًّا أو لا نهائيًّا، وقد يكون متصلًا أو مليئًا بالثقوب، أو حتى غير متصل يتوزع على قطع منفصلة لا يمكنها أبدًا أن تتفاعل بعضها مع بعض.

إنَّ الجزء الأكبر من الكون فضاء فارغ، لكنه يحتوي على الكثير من المادة أيضًا؛ إذ توجد به ٢٠٠ مليار مجرة تقريبًا، وكلٌّ منها يحتوي على ما يتراوح بين ٢٠٠ و٤٠٠ مليار نجم. ثمَّة أهمية للطريقة التي تتوزع بها المادة أيضًا؛ لأنَّ معادلات أينشتاين للمجال تربط بين هندسة الزمكان وتوزيع المادة.

لا شك أنَّ المادة الموجودة في الكون «لا» تتوزع بالتساوي على النطاقات التي رصدناها، لكنَّ تاريخ هذا الاكتشاف لا يعود إلا لبضعة قرون فقط. أما قبل ذلك، فقد كان الرأي السائد أنَّه فيما فوق نطاق المجرات، يبدو التوزيع الإجمالي للمادة متساويًا، مثلما يبدو العشب متساويًا إلا أن ترى قِطَعه المنفصلة. غير أنَّ كوننا يبدو كعشب يحتوي على قطع كبيرة من البرسيم والطين، مما يشكِّل هيكلًا غير متساوٍ على النطاقات الأكبر. وحين تحاول الحصول على منظر متساوٍ من هذا الهيكل عن طريق النظر له على نطاق أكبر، يختفي العشب وترى موقف سيارات المتجر. بصياغة أكثر اعتيادية، ثمَّة نزعة مميِّزة للتوزيع الكوني للمادة بأن تكون متكتلة على مجموعة ضخمة من النطاقات.

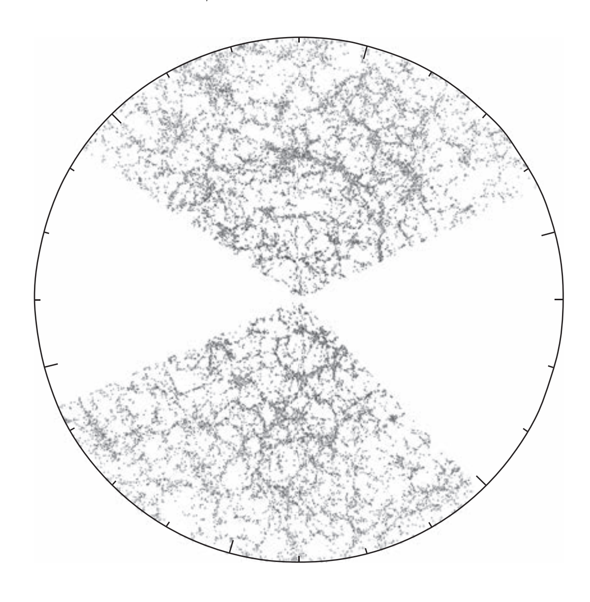
في المجاورة التي نقطن بها، تكتل القدْر الأكبر من مادة النظام الشمسي معًا ليكوِّن نجمًا؛ الشمس. ثمَّة أجزاء أصغر أيضًا هي الكواكب، ويوجد ما هو أصغر منها أيضًا متمثِّلًا في الكواكب، وما هو أصغر من الكواكب متمثِّلًا في الأقمار والكويكبات وأجسام حزام كايبر، إضافةً إلى صخور صغيرة مختلفة، والحصى والغبار والجزيئات والذرات والفوتونات. وإذا انتقلنا في الاتجاه المعاكس إلى النطاقات الأكبر، فسنجد أنواعًا أخرى

من التكتل. فقد نجد العديد من النجوم المقيَّدة بالجاذبية لتشكل أنظمة نجمية ثنائية أو ثلاثية. توجد العناقيد المفتوحة أيضًا، وهي مجموعات تتكوَّن من ألف نجم تقريبًا تشكَّلت جميعها في الوقت نفسه تقريبًا ومن الغيمة الجزيئية المنهارة نفسها. توجد هذه العناقيد داخل المجرات، ونحن نعرف بوجود ما يقرب من ١١٠٠ منها في مجرتنا. توجد العناقيد الكروية أيضًا التي تتألف من مئات آلاف النجوم القديمة في شكل كروي مغبَّش ضخم، وعادةً ما توجد في صورة توابع تدور حول المجرات. تحتوي مجرتنا على ١٥٢ من العناقيد الكروية المعروفة، وربما يكون عددها الإجمالي في المجرة هو ١٨٠.

تُعد المجرات مثالًا واضحًا على التكتل في الكون؛ فهي بقع أو أقراص أو أشكال حلزونية تحتوي على نجوم يتراوح عددها بين ألف و١٠٠ تريليون نجم، وتتراوح أقطارها بين ٣٠٠٠ و٣٠٠٠٠٠ من السنين الضوئية. غير أنَّ المجرات لا تتوزع بالتساوي هي أيضًا. فهي توجد غالبًا في مجموعات قريبة بعضها من بعض تتألف من خمسين عنقودًا مجرِّيًّا تقريبًا، وقد توجد أيضًا في أعداد كبيرة (تصل إلى الألف). تتجمع هذه العناقيد بدورها لتكوِّن عناقيد فائقة تتكتل معًا لتشكِّل رقائق وشعيرات شديدة الاتساع على نحوٍ لا يوصف، مع وجود فراغات ضخمة فيما بينها.

نقطن نحن، على سبيل المثال، في مجرة هي جزء من المجموعة المحلية للمجرات، والتي تضم مجرة «أندروميدا (إم ٣١)»، و٥٢ غيرها من المجرات التي ينتمي العديد منها إلى فئة المجرات القزمة مثل سحابتي ماجلان اللتين هما بمثابة تابعتين للمجرتين الحلزونيتين الأساسيتين: مجرة «أندروميدا» ومجرتنا. يوجد ما يقرب من ١٠ مجرات قزمة غير مقيدة بالجاذبية مع المجرات الأخرى. أما المجرة الأساسية الكبيرة الأخرى في المجموعة المحلية، فهي مجرة «المثلث» التي قد تكون تابعة لمجرة «أندروميدا». يبلغ قطر المجموعة المحلية ١٠٠٠٠ سنة ضوئية تقريبًا. وهي جزء من العنقود الفائق «لانياكيا»، الذي حُدِّد عام ٢٠١٤ في إجراء لتعريف العناقيد الفائقة رياضيًّا من خلال تحليل السرعة التي تتحرك بها المجرات إحداها بالنسبة إلى الأخرى. يبلغ قطر العنقود الفائق «لانياكيا» ٥٢٠ مليون سنة ضوئية ويضم ١٠٠٠٠٠ مجرة.

ونظرًا لاكتشاف المزيد من التكتلات الجديدة والكبيرة، يواصل علماء الكونيات مراجعة النطاق الذي يعتقدون أنَّ الكون يصبح متساويًا عنده. تتمثَّل وجهة النظر الحالية في أنَّ التكتلات والفراغات لا ينبغي أن تكون أكبر من مليار سنة ضوئية، وينبغي أن يكون معظمها أصغر من ذلك. ولهذا فإنَّ بعض الملاحظات الحديثة مربكة بعض الشيء. فقد اكتشف فريق بقيادة أندرياس كوفاتش فراغًا يمتد قطره إلى ملياري سنة



قطعتان من المجرات باستخدام «مسح سلون الرقمي للسماء» توضحان الشعيرات والفراغات. تقع الأرض في المركز. تمثل كل نقطة مجرة من المجرات، ويبلغ نصف قطر الدائرة ملياري سنة ضوئية.

ضوئية، ووجد روجر كلويس وزملاء له تركيبًا كونيًّا متجانسًا يبلغ ضعف ذلك الحجم، وهي «مجموعة الكويزارات الكبيرة الضخمة»، التي تضم ٧٣ من الكويزارات (أشباه النجوم). يبلغ حجم التركيب الأول ضعف أكبر حجم متوقَّع لتركيب موحَّد، بينما يبلغ حجم التركيب الثاني أربعة أضعاف أكبر حجم متوقع لتركيب موحد. وقد رصدت مجموعة لايوش بالاج حلقة من مفجِّرات أشعة جاما يبلغ قطرها ٥٫٦ مليارات سنة ضوئية، وهو تركيب أكبر حتى من سابقيه.[1]

إنَّ هذه الاكتشافات مثيرة للجدل، وكذلك هي تفسيراتها وبدرجة أكبر. يشكك البعض في معنى هذه الملاحظات. ويحاجج البعض بأنَّ وجود بضعة من التراكيب الكبيرة على نحوٍ استثنائي لا يمنع أن يكون الكون متجانسًا «في المتوسط». وبالرغم من أنَّ ذلك صحيح، فهو غير مقنع تمامًا؛ لأنَّ هذه التراكيب لا تتلاءم مع النموذج الرياضي القياسي: كون متعدد الجوانب ليس متجانسًا في المتوسط فحسب؛ بل في كل مكان إلا من انحرافات تقل عن مليار سنة ضوئية. لقد تهاوت جميع التأكيدات السابقة على وجود التجانس

على نطاقات أصغر حينما أُجريت مسوحات أحدث وأوسع نطاقًا. ويبدو أنَّ الأمر يحدث مجددًا.

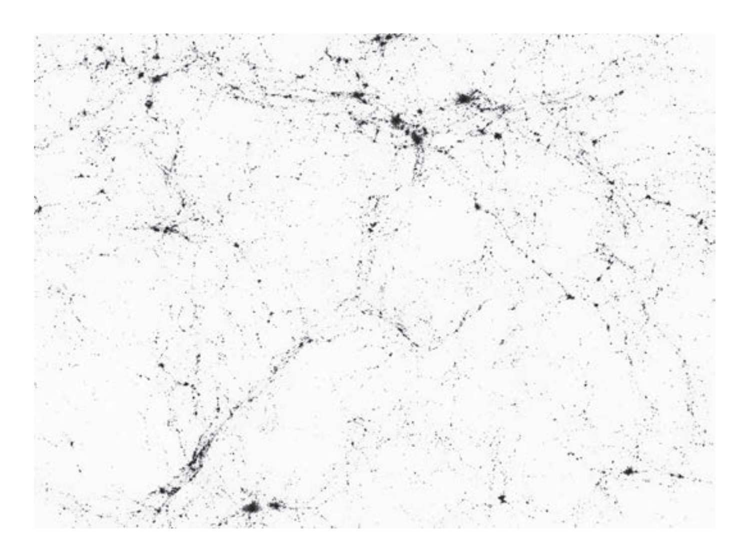
يجدر بنا القول إنَّ تحديد العناقيد ليس بالمهمة التافهة. فما الذي يمثل على وجه التحديد عنقودًا وما يمثل عنقودًا فائقًا؟ إنَّ العين البشرية بطبيعتها ترى التكتلات، غير أنه لا يلزم أن تكون هذه التكتلات مترابطة على نحوٍ ذي مغزًى في سياق الجاذبية. ويستخدم الحل أسلوبًا يُعرَف باسم مرشحات وينر، وهو نوع معقَّد من ملاءمة بيانات المربعات الدنيا التي يمكن أن تفصل الإشارات عن الضوضاء. ويُعدَّل هذا الأسلوب في هذه الحالة لفصل حركات المجرات إلى جزء يمثِّل تمدُّد الكون، وهو مشترك بين جميع المجرات، وجزء آخر يوضح «حركاتها الفعلية» الفردية بالنسبة إلى ذلك التمدد. تنتمي المجرات التي تقع في المنطقة العامة نفسها، والتي تتسم بحركات فعلية متشابهة، إلى العنقود الفائق نفسه. إنَّ الكون يشبه مائعًا تمثل النجوم ذراته، والمجرات دواماته، والعناقيد الفائقة هي تراكيبه الواسعة النطاق. وباستخدام مرشحات وينر، يمكن تحديد أنماط دفق هذا المائع.

لقد صمَّم علماء الكونيات نماذج محاكاة لكيفية تكتل المادة معًا في هذا الكون بفعل الجاذبية. ويبدو أنَّ الصورة العامة التي تتمثَّل في وجود خصل رقيقة وصفائح من المادة تفصل بينها فراغات ضخمة، هي تركيب منطقي لنظام كبير من الأجسام التي تتفاعل من خلال الجاذبية. بالرغم من ذلك، فإنَّ محاولة مطابقة إحصائيات الخصل والصفائح مع الملاحظات الرصدية، أو حتى الحصول على توزيع واقعي للمادة على مدار النطاق الزمني التقليدي الذي يبلغ ١٣٫٨ مليار عام، أصعب كثيرًا.

تتمثَّل الطريقة المعتادة للتغلب على هذه العقبة في استدعاء وجود جسيمات غامضة تُدعى بالمادة المظلمة. يعزز هذا الافتراض فعليًّا من قوة الجاذبية؛ مما يسمح بتطور التراكيب الكبيرة بسرعة أكبر، لكنه ليس مُرضيًا تمامًا، انظر الفصل الثامن عشر. ثمَّة بديل آخر غالبًا ما يُغفَل، وهو احتمالية أن يكون الكون أقدمَ كثيرًا مما نظن. أما البديل الثالث، فهو أننا لم نتوصل إلى النموذج الصحيح بعد.

بعد ذلك نأتي إلى الحجم.

حين اخترق علماء الفلك الكون بتلسكوبات قوية للغاية، لم يكونوا يرون ما هو أبعد فحسب؛ بل كانوا يرون الماضي أيضًا. لمَّا كان للضوء سرعة محدودة، فإنه يستغرق



محاكاة حاسوبية لمنطقةٍ يبلغ قطرها ٥٠ مليون سنة ضوئية لأحد نماذج توزيع المادة المرئية في الكون.

مقدارًا محددًا من الوقت لينتقل من مكان إلى آخر. وتُعرَّف السنة الضوئية بالفعل بأنها المسافة التي يقطعها الضوء في عام.

ينتقل الضوء بسرعة كبيرة للغاية؛ لذا فالسنة الضوئية تمثِّل مسافة طويلة للغاية تساوي ٩٫٤٦ تريليونات كيلومتر. يقع أقرب نجم إلينا على بُعد ٤٫٢٤ سنوات ضوئية؛ ومن ثمَّ فحين يراه أي شخص من خلال التلسكوب فإنه يراه كما كان قبل أربع سنوات وربع. وبحسب ما نعرفه، ربما يكون قد انفجر بالأمس، (لكنَّ ذلك غير مرجح في حقيقة الأمر، فهو لم يبلغ تلك المرحلة من تطوره بعد)، غير أننا لن نعرف إذا حدث ذلك إلا بعد أربعة أعوام وربع أخرى.[2]

يبلغ الرقم الحالي لنصف قطر الكون القابل للرصد ٤٥٫٧ مليار سنة ضوئية تقريبًا. وقد نتخيل بسذاجة أننا نستطيع إذن أن نرى ٤٥٫٧ مليار عام في الماضي. غير أننا لا نستطيع ذلك لسببَين. أولهما أنَّ مصطلح «الكون القابل للرصد» يشير إلى ما سيكون من الممكن رصده بصورة مبدئية، لا ما نراه فعليًّا. وثانيهما أنَّ العلماء يعتقدون الآن أنَّ عمر الكون ١٣٫٨ مليار عام فحسب. وتُفسَّر الفترة المفقودة والتي تبلغ ٣١٫٩ مليار عام بتمدد الكون، لكنني سأناقش ذلك في الفصل التالي.

تلك مساحة كبيرة للغاية من الكون. وذلك هو الجزء القابل للرصد فحسب. ربما توجد أجزاء أخرى. وعلى أية حال، يمكننا تقديم إجابة مستنيرة لسؤال: «ما مدى ضخامة الكون؟» إذا فسرناه بطريقة منطقية.

على العكس من ذلك، فإنَّ إجابة السؤال: «ما شكل الكون؟» أصعب كثيرًا، وهي مصدر للكثير من الجدل.

قبل أن يتوصل أينشتاين إلى كيفية دمج الجاذبية في نظريته النسبية للزمكان، كان الجميع تقريبًا يفترضون أنَّ شكل الكون لا بد أن ينتمي إلى الهندسة الإقليدية. من أسباب ذلك أنه على مدار فترة طويلة من الوقت فيما بين تأليف إقليدس لكتاب «العناصر» وبين مراجعة أينشتاين الجذرية للفيزياء، كان الاعتقاد السائد أنه لا يوجد سوى الهندسة الإقليدية.

تحطَّم هذا الاعتقاد في القرن التاسع عشر حين اكتشف الرياضيون أشكالًا هندسية متسقة ذاتيًّا لا تنتمي إلى الهندسة الإقليدية، وبالرغم من أنَّ لهذه الأشكال تطبيقاتها الرائعة في الرياضيات، فلم يكن أحد تقريبًا يتوقَّع أنها ستنطبق في الحياة الواقعية. كان جاوس هو الاستثناء الذي اكتشف الهندسة غير الإقليدية لكنه احتفظ بالأمر سرًّا؛ لأنه رأى أنَّ أحدًا لن يتقبلها؛ ففضل أن يتجنب النقد غير المدروس. لا شك أنَّ الهندسة الكروية كانت معروفة؛ فعادةً ما كان البحارون وعلماء الفلك يستخدمون نظرية معقدة لحساب المثلثات الكروي. غير أنَّ ذلك كله كان مقبولًا لأنَّ الكرة ليست سوى سطح مكاني في الفضاء الإقليدي المعتاد. فهي ليست الفضاء نفسه.

فكَّر جاوس أنه إذا لم يكن يلزم أن تكون الهندسة إقليدية، فلا يلزم أن يكون الفضاء الفعلي إقليديًّا أيضًا. ومن الطرق التي يمكن استخدامها للتمييز بين أنواع الهندسات المختلفة، جمع زوايا المثلث. ففي الهندسة الإقليدية نحصل على مجموع يساوي ١٨٠ درجة على الدوام. وفي أحد أنواع الهندسات غير الإقليدية (الهندسة الإهليلجية)، نحصل على مجموع أكبر من ١٨٠ درجة على الدوام، وفي نوع آخر هو هندسة القطع الزائد، نحصل على مجموع أقل من ١٨٠ درجة على الدوام. ويتوقف العدد الدقيق على مساحة المثلث. حاول جاوس أن يتوصل إلى الشكل الفعلي للفضاء من خلال قياس مثلث تشكِّله ثلاثة من قمم الجبال، لكنه لم يحصل على إجابة مقنعة. المفارقة أنه وفقًا لما فعله أينشتاين بالرياضيات التي انبثقت عن هذه الاكتشافات، فإنَّ الجذب الثقالي للجبال تداخل مع حساباته.

بدأ جاوس يتساءل عن الكيفية التي يمكن من خلالها حساب كمية انحناء سطح ما؛ أي مدى حدة انحنائه. حتى ذلك الوقت، كان السطح يُرى عادةً على أنه حد جسم صلب في الفضاء الإقليدي. لكنَّ جاوس لم يوافق على ذلك. فقد رأى أنَّ وجود جسم صلب ليس ضروريًّا؛ بل إنَّ السطح وحده كافٍ. ورأى أنَّ وجود فضاء إقليدي محيط ليس ضروريًّا أيضًا. فكل ما يلزم هو وجود شيء يحدِّد السطح، وكان يرى أنَّ هذا الشيء هو مفهوم للمسافة: «مترية». وتُعد المترية من الناحية الرياضية صيغة للمسافة بين أي نقطتين قريبتين للغاية من إحداهما الأخرى. ومن هذا، يمكنك حساب المسافة بين أي نقطتين من خلال نظم سلسلة من النقاط المتجاورة للغاية معًا، مع استخدام الصيغة لإيجاد المسافة بين تلك النقاط، ثم جمع كل تلك المسافات القصيرة، واختيار سلسلة النقاط المتجاورة بعد ذلك للتوصل إلى أصغر نتيجة ممكنة. تتلاءم سلسلة النقاط المتجاورة معًا لتشكيل منحنًى يُسمى بالجيوديسي، وهو الطريق الأقصر بين هاتين النقطتين. قادت هذه الفكرة جاوس إلى صيغة أنيقة للانحناء، وإن كانت صيغة معقدة. ومن المثير للاهتمام أنَّ هذه الصيغة لا تذكر أي فضاء محيط. ذلك أنه جوهري في السطح. فانحناء الفضاء الإقليدي صفري؛ أي أنه مسطح.

أدى ذلك إلى فكرة جذرية، وهي أنَّ الفضاء يمكن أن يكون منحنيًا دون أن ينحني «حول» أي شيء. فالكرة على سبيل المثال، تنحني بوضوح على الشكل الكروي الصلب الذي تتضمنه. لكي تصنع أسطوانة، تأخذ ورقة و«تثنيها» إلى دائرة؛ إذن فالسطح الأسطواني ينحني حول الأسطوانة الصلبة الذي يحدها. غير أنَّ جاوس تجاوز ذلك النمط القديم من التفكير. فقد أدرك أنه يمكن رصد انحناء السطح دون تضمينه في الفضاء الإقليدي.

كان يحب أن يشرح ذلك من خلال تشبيهه بنملة تعيش على سطحٍ لا تستطيع تركه، ولا دخوله، ولا إطلاق نفسها في الفضاء. فالسطح هو كل ما تعرفه النملة. وحتى الضوء مقتصر على السطح، ويتحرك على المنحنيات الجيوديسية؛ فلا تستطيع النملة أن تعرف أنَّ مُناظِرها للفضاء منحنٍ. بالرغم من ذلك، يمكنها استنتاج الانحناء بإجراء مسح. فالمثلثات الضئيلة تخبرها بمترية عالمها، ويمكنها تطبيق صيغة جاوس بعد ذلك. ومن خلال الزحف في الأرجاء لقياس المسافة، يمكنها «استنتاج» أنَّ كونها منحنٍ.

إنَّ هذا المفهوم للانحناء يختلف في بعض النواحي عن الاستخدام العادي. فالجريدة الملفوفة على سبيل المثال «ليست» منحنية، بالرغم من أنها تشبه الأسطوانة. لكي تفهم السبب في هذا، انظر إلى الحروف في أحد العناوين. إننا نراها منحنية، لكنَّ أشكالها تظل ثابتة بالنسبة إلى علاقتها بالورق. فلم يتمدد شيء أو يتحرك. لن تلاحظ النملة أي تغيير

في مناطق صغيرة من الجريدة. فوفقًا لمتريتها، لا تزال الجريدة «مسطحة». وفي المناطق الصغيرة، تتسم الجريدة بالهندسة الجوهرية للمستوى المسطح. فمجموع زوايا المثلث الصغير على سبيل المثال يساوي ١٨٠ درجة، إذا قستها داخل الورقة. وسيكون استخدام منقلة صلبة لكنها مرنة في الوقت نفسه مثاليًّا لذلك.

تصبح المترية المسطحة منطقية فور أن تعتاد عليها؛ لأنَّ هذا هو «السبب» في أنك تستطيع لف جريدة لتصنع منها أسطوانة. تبقى جميع الأطوال والزوايا عند قياسها داخل الجريدة مثلما هي. على النطاق المحلي، لا تستطيع النملة التي تقطن الجريدة أن تميِّز الورقة الأسطوانية عن المسطحة.

أما الشكل العالمي؛ أي الهيئة الإجمالية، فهي أمر آخر. ذلك أنَّ الخطوط الجيوديسية للسطح المستوي تختلف عن الخطوط الجيوديسية للأسطوانة. فجميع الخطوط الجيوديسية للسطح المستوي خطوط مستقيمة تمتد إلى ما لا نهاية ولا تنغلق أبدًا. أما على الأسطوانة، فيمكن لبعض الخطوط الجيوديسية أن تنغلق؛ إذ تلتف حول الأسطوانة ثم تعود إلى نقطة بدايتها. تخيَّل أنك تستخدم شريطًا مطاطيًّا لتحافظ على الجريدة ملفوفة. ستجد أنَّ الشريط المطاطي يشكِّل خطًّا جيوديسيًّا مغلقًا. يتعلق هذا النوع من الاختلاف الإجمالي في الشكل بالطبولوجية العامة، وهي الكيفية التي تتلاءم بها أجزاء السطح معًا. أما المترية، فهي تخبرنا عن الأجزاء فحسب.

لقد كان وضع الحضارات السابقة شديد الشبه بوضع النملة. فهي لم تكن تستطيع الصعود إلى الأعلى في منطاد أو طائرة لرؤية شكل الأرض. بالرغم من ذلك، كانت تستطيع إجراء القياسات ومحاولة استنتاج الحجم والطوبولوجية. وعلى العكس من النملة، كانت لديها بعض المساعدة الخارجية؛ الشمس والقمر والنجوم. بالرغم من ذلك، فحين يتعلق الأمر بشكل الكون بأكمله، فإننا نصبح في وضع النملة نفسه تمامًا. علينا أن نستخدم ما يناظر الحيل الهندسية التي تستخدمها النملة لاستنتاج الشكل من الداخل.

من منظور النملة، ليس للسطح سوى بُعدين فحسب. ومعنى هذا أنَّ وضع خريطة لأي رقعة محلية لا يستلزم سوى اثنين من الإحداثيات. من خلال تجاهل الاختلافات الصغيرة في الارتفاع، يحتاج البحارون الأرضيون إلى معرفة خطَّي الطول والعرض فحسب، لتحديد موقعهم على سطح الأرض. كان لجاوس تلميذ بارع يُدعى برنارد ريمان، ومع تشجيع لا يخفى من معلِّمه، توصل ريمان إلى فكرة رائعة تتمثَّل في تعميم صيغة جاوس للانحناء على جميع «الأسطح» أيًّا كان عدد أبعادها. ولأنَّ ما يصفه لا ينتمي

إلى فئة الأسطح في واقع الأمر، فقد احتاج إلى مصطلح جديد، واختار الكلمة الألمانية «مانيشفالتيشكايت»، وترجمتها «مشعب»، مما يشير إلى وجود عدد كبير من الإحداثيات.

أُصيب بعض الرياضيين الآخرين، ومن الجدير بالملاحظة أنَّ معظمهم من الإيطاليين، بعدوى المشعب؛ مما أدى إلى ابتكار مجال جديد في الرياضيات هو الهندسة التفاضلية. توصل هؤلاء الرياضيون إلى معرفة معظم الأفكار الأساسية عن المشاعب. بالرغم من ذلك، فقد كانوا يعالجون الأفكار من منظور رياضي محض. لم يتخيل أحد قط أنَّ الهندسة التفاضلية قد تنطبق على المكان الفعلي.

بعد ما حقَّقه أينشتاين من نجاح مع النسبية الخاصة، حوَّل انتباهه على الفور إلى العنصر الأساسي الناقص؛ الجاذبية. ظل يواجه صعوبة على مدار سنوات قبل أن يخطر له أنَّ هندسة ريمان هي المفتاح. وواجه صعوبة أكبر ليتقن ذلك المجال الصعب في الرياضيات، وساعده في ذلك مارسيل جروسمان، صديقه الرياضي الذي كان له بمثابة مرشد وموجِّه.

أدرك أينشتاين أنه يحتاج إلى تنويعة غير تقليدية من الهندسة الريمانية. فالنسبية تسمح للمكان والزمان بأن يختلطا إلى حدٍّ ما، وإن كان كل من المفهومين يؤدي دورًا مختلفًا. وفقًا للمشعب الريماني التقليدي، تُعرَّف المترية باستخدام الجذر التربيعي لصيغة تكون موجبة على الدوام. ومثل نظرية فيثاغورس، فإنَّ صيغة المترية مجموع (مُعمَّم ومحلي) من المربعات. أما في النسبية الخاصة، فالكمية المناظِرة تتضمن «طرح» مربع الزمن. كان على أينشتاين أن يسمح بوجود حدود سالبة في المترية؛ مما أدى إلى ما يُعرف الآن باسم المشعب الريماني الزائف. كانت النتيجة النهائية لكفاح أينشتاين البطولي، هي معادلات أينشتاين للمجال، التي ربطت انحناء الزمكان بتوزيع المادة. فالمادة تثني الزمكان، والزمكان المنحني يغيِّر هندسة الخطوط الجيوديسية التي تتحرك المادة فيها.

لا يصف قانون نيوتن للجاذبية حركة الأجسام بصورة مباشرة. وإنما هو معادلة توفر حلولها ذلك الوصف. ينطبق الأمر نفسه على معادلات أينشتاين التي لا تصف شكل الكون بصورة مباشرة. وإنما يجب عليك حلها. وهي معادلات غير خطية في ١٠ متغيرات؛ ومن ثمَّ فهي صعبة.

إننا نتمتع بدرجة من الحدس نفهم بها المشاعب الريمانية، لكنَّ المشاعب الريمانية الزائفة ملغِزة بعض الشيء ما لم تستخدمها بانتظام. ثمَّة تبسيط مفيد يسمح لي بالحديث عن شكل «المكان»؛ أي المشعب الريماني على نحوٍ ذي مغزًى، بخلاف ذلك المفهوم غير الواضح المتمثل في شكل «الزمكان»؛ أي المشعب الريماني الزائف.

لا يوجد في النسبية مفهوم ذو مغزًى للتزامن. فيمكن لمشاهدين مختلفين مشاهدة الأحداث نفسها وهي تقع في ترتيب مختلف. أرى أنا القطة تقفز من النافذة قبيل أن تسقط المزهرية على الأرض، بينما ترى أنت المزهرية تسقط قبيل أن تقفز القطة. فهل حطَّمت القطة المزهرية، أم أنَّ سقوط المزهرية قد أفزع القطة؟ (جميعنا يعرف أيُّ الأمرين أكثر رجحانًا، لكنَّ القطة لديها محامٍ بارع اسمه ألبرت أينشتاين.)

على أية حال، بالرغم من أنَّ التزامن المطلق غير ممكن، فثمَّة بديل له هو الإطار المساير. ليس ذلك سوى اسم فخم لإطار مرجعي، أو نظام إحداثي يمثِّل الكون كما يراه مُشاهد محدَّد. ابدأ من مكاني الآن، بصفتي نقطة أصل الإحداثيات وسافر بسرعة الضوء لمدة ١٠ سنوات إلى نجم قريب. حدِّد الإطار بحيث يبعد النجم عن نقطة الأصل بمسافة ١٠ سنوات ضوئية، ويبعد في الزمن بمقدار ١٠ سنوات في المستقبل. افعل ذلك لكل الاتجاهات والأزمان: وذلك هو الإطار المساير الخاص بي. كلٌّ منا يمتلك مثل ذلك الإطار، الأمر كله أنَّ إطارك قد يبدو غير متسق مع إطاري إذا بدأ أحدنا بالتحرك.

إذا كانت حركتك تبدو ساكنة في الإطار المساير الخاص بي، فسنكون نحن مشاهدين مسايرين. بالنسبة إلينا، يُحدَّد الشكل المكاني للكون وفقًا لنظام الإحداثيات المكاني الثابت نفسه. قد يتغير الشكل والحجم على مدار الوقت، لكن توجد طريقة متسقة لوصف تلك التغيرات. من الناحية الفيزيائية، يمكن تمييز الإطار المساير عن غيره من الإطارات: ينبغي أن يبدو الكون بالطريقة نفسها في جميع الاتجاهات. أما في إطار غير مساير، فإنَّ بعض أجزاء السماء ستنزاح نحو الأحمر بصورة منهجية، بينما تنزاح أجزاء أخرى نحو الأزرق. وهذا هو السبب في أنني أستطيع التحدُّث على نحو منطقي عن الكون بصفته كرة متمددة مثلًا. حينما أفصل المكان والزمان على هذا النحو، فإنَّ هذا يعني أنني أشير إلى إطار مساير.

تتخذ القصة الآن منعطفًا غريبًا نحو عالم علم الأساطير. لقد اكتشف الفيزيائيون والرياضيون حلولًا لمعادلات المجالات تتماشى مع الهندسات غير الإقليدية الكلاسيكية. تظهر هذه الهندسات في الأماكن ذات الانحناء الثابت الموجب (القطع الناقص)، وذات الانحناء الصفري (سطح مستوٍ إقليدي)، وذات الانحناء الثابت السالب (القطع الزائد). لا بأس بذلك حتى الآن. غير أنَّ هذه العبارة الصحيحة تحولت بسرعة إلى اعتقاد بأنَّ هذه الهندسات الثلاث هي الحلول الثابتة الانحناء «الوحيدة» لمعادلات المجال.

أظن أنَّ هذا الخطأ قد وقع لأنَّ الرياضيين وعلماء الفلك لم يكونوا يتواصلون جيدًا. فالمبرهنة الرياضية تنص على أنَّه في حالة وجود أي قيمة ثابتة للانحناء، تكون «مترية» الزمكان الثابت الانحناء، فريدة من نوعها؛ لذا كان من السهل جدًّا افتراض أنَّ «الهندسة» لا بد أن تكون فريدة أيضًا. أليست المترية تحدد الفضاء في نهاية المطاف؟

كلَّا.

إنَّ نملة جاوس كانت ستقترف الخطأ نفسه لو أنها لم تعرف الفرق بين السطح المستوي والأسطوانة. فهما يتخذان المترية نفسها، لكنَّهما يختلفان في الطوبولوجية. ذلك أنَّ المترية لا تحدد سوى الهندسة «المحلية» لا الشاملة. وينطبق هذا الفرق على النسبية العامة، بالتضمين نفسه.

تُعد الطارة المسطحة من أمثلة التضاد المبهجة على ذلك. تتخذ الطارة شكل كعكة دونَت بها ثقب مركزي، وهي أبعد ما يكون عن الاستواء. بالرغم من ذلك، تنطوي طوبولوجية كعكة الدونَت على مشعب مسطح (انحناء صفري). ابدأ بمربع، وهو سطح مستوٍ، وألصق الحواف المتقابلة معًا «ذهنيًّا». لا تفعل ذلك بثني المربع ماديًّا؛ بل حدِّد النقاط المتناظرة على الحواف المتقابلة فحسب. معنى هذا أنك ستضيف قاعدة هندسية لتقول إنَّ تلك النقاط «متطابقة».

ينتشر هذا النوع من التطابق في ألعاب الكمبيوتر، حين يندفع وحش فضائي نحو أحد حواف الشاشة ويظهر من جديد عند الحافة المقابلة. يطلِق المبرمجون على ذلك مصطلح «اللف الدائري»»، وهي استعارة حيوية لكنها غير حكيمة إن طُبِّقَت حرفيًّا. كانت النملة ستفهم الطارة المسطحة تمام الفهم: سيؤدي لف الحواف الرأسية دائريًّا إلى تحويل الشاشة لأسطوانة. بعد ذلك، تكرر هذه العملية لضم طرفي الأسطوانة معًا، فتشكل بذلك سطحًا يتطابق مع طوبولوجية الطارة. أخذت الطارة متريتها من المربع؛ لذا فهي مسطحة. أما المترية الطبيعية لكعكة دونَت حقيقية فهي تختلف عن هذا؛ لأنَّ ذلك السطح مدمج في الفضاء الإقليدي.

يمكنك ممارسة لعبة الطارة المسطحة مع الزمكان النسبوي، باستخدام نسخة مينكوفسكي المختصرة ذات البعدين للنسبية. سيكون مستوى مينكوفسكي المسطح اللانهائي ومربع في ذلك المستوى بحواف محددة متقابلة، كلاهما زمكانين مسطحين. أما من الناحية الطوبولوجية، فأحدهما مستوى مسطح، بينما الآخر طارة. افعل الأمر نفسه مع مكعب وستحصل على طارة مسطحة ثلاثية الأبعاد، تتخذ الأبعاد نفسها التي يتخذها الفضاء.

توجد بنًى مشابهة محتملة في الفضاءات الإهليلجية وفضاءات القطع الزائد. اجتزئ من الفضاء قطعة بالشكل الصحيح، وألصق حوافها معًا في أزواج، وستحصل على مشعب يتسم بالمترية نفسها لكنه يتخذ طوبولوجية مختلفة. يكون العديد من هذه المشاعب مدمجًا؛ أي أنها تتسم بحجم محدَّد ككرة أو طارة. اكتشف الرياضيون عدة فضاءات محددة ذات انحناء ثابت بالقرب من نهاية القرن التاسع عشر. وفي عام ١٩٠٠، وجَّه شفارتزشيلد انتباه علماء الكونيات إلى عملهم حين ذكر الطارة المسطحة الثلاثية الأبعاد بوضوح. وفي عام ١٩٢٤، قال أليكساندر فريدمان الأمر نفسه بشأن الفضاءات ذات الانحناء السالب. على عكس الفضاء الإقليدي وفضاء القطع الزائد، يكون الفضاء الإهليلجي نهائيًّا، بالرغم من ذلك، لا يزال من الممكن تنفيذ الحيلة نفسها فيه للحصول على فضاءات ذات انحناءات موجبة ثابتة وطوبولوجيات مختلفة. بالرغم من ذلك، فقد ظلت نصوص علم الفلك على مدار ٦٠ عامًا بعد ١٩٣٠، تكرر الأسطورة القائلة بأنه لا يوجد سوى ثلاثة فضاءات ذات انحناء ثابت، وهي الهندسات غير الإقليدية الكلاسيكية. ولهذا، ظل علماء الفلك يعملون على هذا النطاق المحدد من أشكال الزمكان، لاعتقادهم الخاطئ بعدم وجود احتمالات أخرى.

وفي مطاردة لصيدٍ أكبر، حوَّل علماء الكونيات انتباههم إلى أصل الكون، دون أن يأخذوا بعين الاعتبار سوى الهندسات الكلاسيكية الثلاث ذات الانحناء الثابت، واكتشفوا مترية الانفجار العظيم، وتلك قصة سنتناولها في الفصل التالي. كان ذلك اكتشافًا عظيمًا حتى إنَّ شكل الفضاء لم يَعد قضية ملحة لبعض الوقت. «عرف» الجميع أنه على شكل كرة؛ لأنَّ تلك هي المترية الأبسط للانفجار العظيم. بالرغم من ذلك، فلا يوجد سوى القليل من الأدلة الرصدية التي تؤيد ذلك الشكل.

لقد اعتقدت الحضارات القديمة أنَّ الأرض مسطحة، وبالرغم من أنها كانت مخطئة في ذلك؛ فإنها امتلكت بعض الأدلة: ذلك هو الشكل الذي تبدو عليه. وحين يتعلق الأمر بالكون، فإننا نعرف أقل مما كانت تعرفه. غير أنه توجد بعض الأفكار التي قد تقلل من جهلنا.

إذا لم يكن كرة، فماذا يكون؟

في عام ٢٠٠٣، كان «مسبار ويلكينسون لتباين الأشعة الميكروية» (WMAP) التابع لناسا، يقيس إشارة راديوية توجد في كل مكان تُدعى بإشعاع الخلفية الكونية الميكروي،

وتَرِد نتائجه لاحقًا. يوضح التحليل الإحصائي للتقلبات في مقدار الإشعاع القادم من اتجاهات مختلفة بعض التلميحات عن الكيفية التي تكتلت بها المادة في الكون الوليد. قبل «مسبار ويلكينسون لتباين الأشعة الميكروية»، كان معظم علماء الكونيات يعتقدون أنَّ الكون لا نهائي؛ ومن ثمَّ يجب أن يؤيد المسبار وجود تقلبات كبيرة على نحو اعتباطي. غير أنَّ بيانات «مسبار ويلكينسون» أوضحت وجود حد لحجم التقلبات، مما يدل على أنَّ الكون نهائي. ومثلما صاغت مجلة «نيتشر» الأمر: «إنك لا ترى موجات في حوض استحمامك.»

حلل الرياضي الأمريكي جيفري ويكس إحصائيات هذه التقلبات لمشاعب تتسم بطوبولوجيات مختلفة. جاء أحد الاحتمالات ملائمًا للبيانات بدقة؛ فأعلنت وسائل الإعلام أنَّ الكون على شكل كرة قدم. كانت تلك استعارة حتمية لشكلٍ يعود تاريخه إلى بوانكاريه: الفضاء الاثنا عشري الوجوه. في بدايات القرن الحادي والعشرين، كانت كرات القدم تُصنع بتثبيت ١٢ من المخمسات و٢٠ من السداسيات معًا لتشكيل ما يسميه الرياضيون عشريني الأوجه المبتور؛ أي شكلًا عشريني الأوجه قُطِعَت زواياه. إنَّ عشريني الأوجه مجسم منتظم له ٢٠ وجهًا مثلثًا، يجتمع كل خمسة منها في ركن. ويدخل اثنا عشري الوجوه إلى الصورة لأنَّ مراكز وجوه المجسم العشريني تكوِّن مجسمًا اثني عشري؛ لذا يتسم كلا المجسمين بالتناظر نفسه. وبالرغم من أنَّ تشبيه «كرة القدم» أنسب لوسائل الإعلام، فهو غير دقيق من الناحية التقنية.

إنَّ سطح كرة القدم مشعب ثنائي الأبعاد. وقد كان بوانكاريه من رواد الطوبولوجيا الجبرية، لا سيما في الأبعاد الثلاثة، واكتشف أنه ارتكب خطأً. ولكي يثبت أنه أخطأ (يفعل الرياضيون ذلك الشيء بخلاف السياسيين)، اخترع مشعبًا مناظرًا ثلاثي الأبعاد. وقد بناه بوانكاريه بلصق طارتين معًا، غير أنَّ بناءً أكثر أناقة قد اكتُشِف لاحقًا باستخدام مجسم اثني عشري الوجوه. وهو تنويعة خفية من الطارة المسطحة الثلاثية الأبعاد، يُصنع من خلال لصق الأوجه المتقابلة لمكعبٍ ما معًا على نحو ذهني. افعل ذلك في مجسم اثني عشري، مع لف كل وجه قبل لصقه. ستكون النتيجة مشعبًا ثلاثي الأبعاد، وهو الفضاء الاثنا عشري. وكالطارة المسطحة الثلاثية الأبعاد، ليس لهذا الفضاء حد؛ فأي شيء يسقط عبر أحد الأوجه، يظهر ثانية عبر الوجه المقابل. يتسم هذا الفضاء بانحناء موجب، وهو نهائي.

حلل ويكس إحصائيات تقلبات إشعاع الخلفية الكوني الميكروي في حالة أن يكون الكون فضاءً اثني عشري، ووجد تطابقًا رائعًا مع بيانات «مسبار ويلكينسون». واستنتجت

مجموعة بقيادة جون-بيير لومينيه أنَّ كونًا بذلك الشكل لا بد أن يبلغ قطره ٣٠ مليار سنة ضوئية — لا بأس بذلك. غير أنَّ الملاحظات الحديثة تدحض هذه النظرية على ما يبدو، مثبِّطةً بذلك كل أفلاطوني على الكوكب.

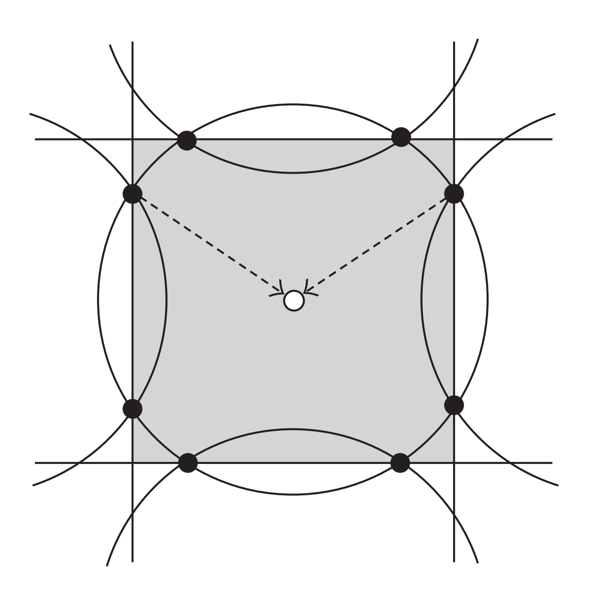
من الصعب أن نعرف الكيفية التي يمكن أن نثبت بها أنَّ الكون نهائي، لكننا قد نتمكن من معرفة شكله إذا كان نهائيًّا. لا بد أن يضم الكون النهائي بعض الخطوط الجيوديسية المغلقة، وهي أقصر المسارات التي تكون حلقات، كالشريط المطاطي الملفوف حول جريدة ملفوفة. فشعاع الضوء المتحرك على مثل هذه الخطوط الجيوديسية سيعود في النهاية إلى نقطة منشئه. إذا وجَّهت تلسكوبًا قويًّا في ذلك الاتجاه، فسترى ظهر رأسك. الحق أقول لك إنَّ ذلك سيستغرق بعض الوقت، بمقدارِ ما يستغرقه الضوء ليقطع طريقه كاملًا عبر الكون؛ لذا عليك أن تظل ساكنًا وتتحلى بالصبر. وقد تجد أن الرأس الذي تشاهده قد انقلب من الأعلى للأسفل، وقد تجده نسخة معكوسة من الأصل.

إنَّ التحليل الرياضي الجاد الذي يأخذ سرعة الضوء النهائية بعين الاعتبار، يتنبأ بأنه في مثل تلك الظروف ينبغي أن توجد أنماط متكررة من إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، تظهر فيها التقلبات نفسها على دوائر محددة في السماء. يحدث هذا لأنَّ إشعاع الخلفية الكونية الميكروي الذي يصل إلى الأرض اليوم بدأ رحلاته من مسافات مشابهة؛ ومن ثمَّ فقد نشأ في الأصل على كرة، «سطح التشتت الأخير». إذا كان الكون نهائيًّا، وكانت هذه الكرة أكبر من الكون، فإنها تلتف على نفسها وتتقاطع. فالكرات تلتقي في دوائر، وكل نقطة على مثل هذه الدوائر ترسل أشعة ميكروية إلى الأرض في اتجاهين مختلفين، بفضل اللف الدائري.

يمكننا توضيح هذا التأثير على نظير ثنائي الأبعاد؛ حيث تكون الهندسة أبسط. إذا كان المربع الموضح في الصورة كبيرًا بما يكفي ليحوي الدائرة، فلن يكون هناك وجود لتقاطع الالتفاف والدائري. وإذا كان المربع صغيرًا بما يكفي لالتفاف الدائرة مرتين، فستكون هندسة التقاطعات أكثر تعقيدًا.

في حالة الطارة الثلاثية المسطحة، يُستبدل بالمربع مكعب، وبالدوائر كرات، وتصبح النقاط دوائر على وجوه المكعب، وهي أيضًا تتطابق في أزواج. وتصبح الخطوط المنقطة مخروطات. من الأرض، نرصد زوجًا من الدوائر المميزة في السماء، وهي في حقيقة الأمر الدوائر البعيدة نفسها، وتُرى من هذين الاتجاهين. ينبغي أن تكون تقلبات إشعاع الخلفية الكوني الميكروي حول هاتين الدائرتين متطابقة تقريبًا، ويمكننا الكشف عن هذا

باستخدام الارتباطات الإحصائية لتقلبات درجة الحرارة؛ فنحن نتوقَّع أن نرى التسلسل نفسه من البقع الساخنة أو الباردة حول كل دائرة، حيث يشير «ساخن» و«بارد» إلى درجات حرارة أعلى من المتوسط، أو أقل منه.[3]



التقاطعات الذاتية لسطح التشتت الأخير في حالة طارة مسطحة، يوضَّح في هذا الرسم بالدائرة الكبيرة. تمثل الدوائر الجزئية الأخرى نسخًا ملتفة دائريًّا. تُمثَّل الطارة بالمربع المظلل ذي الحواف المتقابلة المتطابقة، والأرض هي النقطة البيضاء في المنتصف. تلتقي نسخ الدوائر عند النقاط السوداء التي تتطابق في أزواج ملتفة دائريًّا. توضح الأسهم ذات النقاط الإشعاع الميكروي الذي يصل من المنطقة نفسها من الفضاء في اتجاهين مختلفين.

من هندسة هذه الدوائر، يمكننا نظريًّا استنتاج طوبولوجيا الكون، وتحديد علامة الانحناء، أهو موجب أم صفر أم سالب. بالرغم من ذلك، فلم تنجح هذه الطريقة حتى الآن من الناحية العملية، إما لأنَّ الكون ليس على هذه الشاكلة، أو لأنه أكبر كثيرًا مما يسمح بوجود تلك الدوائر المميزة.

ما شكل الكون إذن؟

لا نعرف إطلاقًا.

الفصل السادس عشر

البيضة الكونية

«في البدء، كان هناك العدم، وانفجر.»

تيري براتشيت، «اللوردات والسيدات»

عند النظر من كوكبنا المريح الصالح للسكن، والحافل بالحياة، والثري بالجمال الطبيعي، فإنَّ باقي أجزاء الكون تبدو عدائية وبعيدة وكالحة، وغير مهمة نسبيًّا. بالرغم من ذلك، فعند النظر إلى كوكبنا من العوالم البعيدة في النظام الشمسي، فإنَّ كوكبنا يتضاءل إلى وحدة بيكسل[1] زرقاء واحدة على صورة فوتوغرافية، تلك النقطة الزرقاء الباهتة الشهيرة، الصورة النهائية التي التقطها مسبار «فوياجر» عام ١٩٩٠. لم تكن تلك النقطة جزءًا من البرنامج العلمي، لكنَّ عالم الفلك ذا البصيرة الثاقبة، كارل ساجان، رأى أنها ستكون فكرة جيدة. وقد أصبحت رمزًا اجتماعيًّا ونفسيًّا. كان المسبار على بُعد بلوتو تقريبًا؛ أي أنه كان لا يزال في الفناء الخلفي للأرض بالنسبة إلى السياق الكوني. ومع هذا، تضاءل كوننا الجميل إلى شذرة ضئيلة للغاية. ومن أقرب نجم إلينا، فإنَّ كاميرا أفضل حتى من أي شيء نمتلكه الآن ستجد صعوبة في رؤية عالمنا أصلًا. ومن نجوم أبعد، يمكن القول إننا لم نوجَد على الإطلاق، بالرغم من الفرق الذي سيحققه وجودنا، وينطبق الأمر نفسه على الأرض والشمس أيضًا. وحين يتعلق الأمر بالمجرات الأخرى، فإنَّ مجرتنا الأم تصبح ضئيلة في السياق الكوني.

إنها فكرة تبعث على التواضع، وهي توضِّح مدى هشاشة كوكبنا في حقيقة الأمر. وهي تجعلنا نتعجب في الوقت نفسه من ضخامة الكون. وعلى نحو بنَّاء بدرجة أكبر، تجعلنا نتساءل عمَّا يوجد أيضًا في الكون، وعن منشأ كل هذا.

لا شك أنَّ مثل هذه الأسئلة قد وردت أيضًا على ذهن البشر في مرحلة ما قبل التاريخ. والمؤكد أنها خطرت بالفعل قبل ٤٠٠٠ عام في حضارات كالصين وبلاد الرافدين ومصر، والتي تركت سجلات مكتوبة. وقد كانت إجاباتها تخيلية، هذا إذا كنت تعتقد أنَّ عزو السبب في كل شيء لا تفهمه إلى آلهة غير مرئية لها أنماط حياتية وأجسام غريبة؛ نوعٌ من ممارسة الخيال، لكنها لم تكن مجدية في نهاية المطاف.

على مدار القرون، جاء العلم بنظرياته الخاصة عن أصل الكون. وقد كانت في مجملها أقل إثارة للاهتمام من السلاحف التي تحمل العالم، والمعارك بين الثعبان الإله والقطة السحرية ذات السيف، أو الآلهة التي تُقطَّع إربًا إلى عشرات الأجزاء ثم تعود ثانية إلى الحياة حين تُجمَّع من جديد. وقد يتضح أيضًا أنها ليست أقرب إلى الحقيقة؛ لأنَّ الإجابات العلمية دائمًا ما تكون شرطية على أن يتم التخلي عنها إذا ظهرت أدلة مناقضة لها. أحد أشهر النظريات على مدار عصر العلم مملة للغاية لأنها تقول بعدم حدوث شيء على الإطلاق؛ فالكون ليس له أصل لأنه كان موجودًا على الدوام. لقد كنت أشعر دائمًا بأنَّ هذا لا يخلصنا من المشكلة؛ لأننا نحتاج إلى تفسير «السبب» في أنه كان موجودًا على الدوام. إنَّ الإجابة المتمثلة في أنه «وُجِد فحسب» أقل إقناعًا حتى من استدعاء ثعبان إله. غير أنَّ الكثيرين لا يعتقدون ذلك.

اليوم يعتقد معظم علماء الكونيات أنَّ الكون بأكمله من مكان وزمان ومادة، قد ظهر إلى الوجود قبل ما يقرب من ١٣٫٨ مليار عام.[2] ظهرت ذرة من الزمكان من العدم وتمدَّدت بسرعة هائلة. وبعد جزء على المليار من الثانية، تضاءل العنف المبدئي بالدرجة الكافية للسماح بظهور الجسيمات الأساسية مثل الكواركات والجلونات إلى الوجود، وبعد جزء آخر على المليون من الثانية، تجمَّعت هذه الجسيمات لتكوين البروتونات والنيوترونات التي نألفها بدرجة أكبر. مرت بضع دقائق قبل أن تتحد تلك الجسيمات معًا وتكوِّن أنوية ذرية بسيطة. إنَّ الذرات هي أنوية زائد إلكترونات، واستغرق الأمر ٣٨٠٠٠٠ من الأعوام كي تظهر الإلكترونات في هذا المزيج، وتتكوَّن ذرات العناصر الأكثر بساطة، وهي الهيدروجين والهيليوم والديوتيريوم. حينذاك فقط أمكن للمادة أن تتكتل معًا تحت تأثير الجاذبية، وظهرت النجوم والكواكب والمجرات في نهاية المطاف. لقد حسب علماء الكونيات الجدول الزمني بدقة بالغة وتفصيل كبير.

يمثل هذا الوصف الذي ذكرت، التصور الشهير الذي يُعرَف باسم «الانفجار العظيم»، وهو اسم ابتكره هويل بسخرية إلى حدٍّ ما. كان هويل مناصرًا قويًّا للنظرية الأساسية

المنافسة في ذلك الوقت، وهي نظرية الحالة الثابتة للكون، التي يفسرها اسمها بوضوح إلى حد كبير. غير أنه بالرغم من ذلك الاسم، فلم يكن الحال أنَّ هذا الكون لا يحدث فيه شيء على الإطلاق. كلُّ ما في الأمر أنَّ ما حدث لم يؤدِّ إلى أية تغييرات جوهرية. كان هويل يرى أنَّ الكون يتمدد تدريجيًّا، ويكتسب المزيد من المكان بينما تظهر جسيمات جديدة ببطء من العدم في الفراغات بين المجرات.

إنَّ علماء الكونيات لم يختلقوا نظرية الانفجار العظيم من العدم. وإنما لاحظ هابل نمطًا رياضيًّا بسيطًا في عمليات الرصد الفلكية، مما جعل الأمر يبدو حتميًّا تقريبًا. لقد كان هذا الاكتشاف ناتجًا ثانويًّا غير متوقع لعمله على المسافات المجرية، لكنَّ تاريخ الفكرة يعود إلى لومتر قبل ذلك ببضع سنوات. ففي بداية القرن العشرين، كان الرأي السائد في علم الكونيات بسيطًا للغاية. تتضمن مجرتنا مادة الكون بأكملها، وما خارجها فراغ لا نهائي. لم تنهَر المجرة بفعل جاذبيتها لأنها تدور حول محورها؛ ومن ثمَّ كان الترتيب بأكمله مستقرًّا. بعد أن نشر أينشتاين النسبية العامة عام ١٩١٥، أدرك بسرعة أنَّ هذا النموذج لوصف الكون لم يَعد مستقرًّا. ذلك أنَّ الجاذبية ستتسبب في انهيار الكون الثابت، سواء أكان يقوم بالدوران أم لا. كانت حساباته تفترض كونًا كرويًّا متناظرًا، لكنَّ البديهة تشير إلى أنَّ المشكلة نفسها ستصيب أي كون نسبوي ثابت.

بحث أينشتاين عن حل لتلك المشكلة ونشره عام ١٩١٧. لقد أضاف حدًّا رياضيًّا لمعادلات المجال التي وضعها، يتمثَّل في المترية مضروبًا في ثابت Λ (الحرف اليوناني لامدا في صورته الكبيرة)، والذي سُميَ بعد ذلك بالثابت الكوني. يتسبَّب هذا الثابت في تمدد المترية، ومن خلال التعديل الدقيق لقيمة Λ يلغي التمدد الانهيار الجذبوي بالضبط.

في عام ١٩٢٧، بدأ لومتر في مشروع طموح: استخدام معادلات أينشتاين لاستنتاج هندسة الكون بأكمله. وباستخدام الافتراض التبسيطي نفسه، وهو أنَّ الزمكان يتسم بالتناظر الكروي، استنتج صيغة مباشرة لهندسة الزمكان الافتراضي هذا. وحين أوَّل لومتر معنى الصيغة، اكتشف أنها تتنبأ بشيء لافت للنظر.

إنَّ الكون يتمدَّد.

في عام ١٩٢٧، كان الرأي الافتراضي أنَّ الكون كان موجودًا على الدوام على الشكل الحالي نفسه تقريبًا. كان «موجودًا» فحسب، لم «يفعل» أي شيء. مثل كون أينشتاين الثابت تمامًا. أما الآن، فقد كان لومتر يجادل على أساس نظرية فيزيائية كان الكثيرون لا يزالون يعتقدون أنها تخمينية إلى حد كبير؛ أنَّه «ينمو». والواقع أنه ينمو بمعدل ثابت؛ فقطره يزيد بالتناسب مع مرور الوقت. حاول لومتر تقدير معدل التمدد من عمليات

الرصد الفلكية، لكنها كانت بدائية للغاية في ذلك الوقت بدرجة لا تسمح بأن تكون مقنعة.

كان مفهوم الكون المتمدد صعبًا في التقبل، إذا كنت تعتقد أنَّ الكون أبدي وثابت. فعلى نحوٍ ما، كان لا بد لكلِّ ما هو موجود أن يصبح أكثر على نحوٍ متزايد. فمن أين أتت كل هذه الأشياء الجديدة؟ لم يكن الأمر منطقيًّا. لم يكن منطقيًّا حتى لأينشتاين نفسه، الذي قال وفقًا للومتر، شيئًا من قبيل: «حساباتك صحيحة، لكنَّ فيزياءك شنيعة.» وربما لم يكن من المشجِّع أيضًا. أنَّ لومتر أطلق على نظريته اسم «البيضة الكونية المنفجرة في لحظة الخلق»، لا سيما وأنه كان كاهنًا يسوعيًّا. لقد بدا الأمر كله إنجيليًّا للغاية بعض الشيء. بالرغم من ذلك، لم يرفض أينشتاين الفكرة تمامًا، واقترح أنَّ على لومتر التفكير في زمكانات متمددة أكثر عمومية دون الافتراض القوي بوجود التناظر الكروي.

وفي غضون بضع سنوات، ظهر الدليل مؤيدًا لومتر. لقد رأينا في الفصل الحادي عشر، كيف أنَّ ليفيت — «كمبيوتر» مرصد هابل — حين قامت بتصنيف سطوع آلاف النجوم لاحظت نمطًا رياضيًّا في نوع واحد محدَّد من النجوم يُسمى بالمتغير القيفاوي. يتمثَّل هذا النمط الرياضي في أنَّ السطوع الجوهري أو اللمعان، يرتبط على نحوٍ رياضي محدَّد، بالفترة التي يتكرر خلالها السطوع. وهذا يتيح لعلماء الفلك استخدام النجوم القيفاوية بصفتها شموعًا معيارية، يمكن مقارنة سطوعها الظاهري بسطوعها الفعلي، مما يخبرنا بمدى بُعدها عنا.

في بادئ الأمر، كانت هذه الطريقة تقتصر على النجوم الموجودة في مجرتنا؛ لأنَّ التلسكوبات لم تكن قادرة على تحديد نجوم فردية في المجرات الأخرى، فضلًا عن رصد طيوفها لرؤيةِ ما إذا كانت نجومًا قيفاوية أم لا. لكن مع تقدُّم التلسكوبات، وجَّه هابِل ناظرَيه نحو سؤال أكبر: ما المسافة التي تبعدها المجرات عنا؟ ومثلما ذكرنا في الفصل الثاني عشر، فقد استخدم عام ١٩٢٤ علاقة ليفيت بين المسافة واللمعان لتقدير المسافة إلى مجرة «أندروميدا (إم ٣١)». كانت إجابته أنَّ المسافة تساوي مليون سنة ضوئية، لكنَّ التقدير الحالي ٢٫٥ مليون سنة ضوئية.

لقد خطت لفيت خطوة صغيرة بالنسبة لسيدة، لكنها قفزة ضخمة على سلم المسافة الكونية. ذلك أنَّ فهم النجوم المتغيرة ربط طريقة اختلاف المنظر الهندسية بملاحظات

السطوع الظاهري. وحينذاك تمكَّن هابل من أن يقفز قفزة أكبر، وفتح بذلك إمكانية وضع خريطة لأي مسافة كونية مهما بلغت ضخامتها.

نبعت الاحتمالية من اكتشاف غير متوقَّع توصَّل إليه فيستو سليفر وميلتون هوماسون، وهو أنَّ أطياف العديد من المجرات تنزاح باتجاه الطرف الأحمر من الطيف. بدا من المرجح أنَّ ذلك يحدث بسبب تأثير دوبلر؛ ومن ثمَّ فلا بد أنَّ المجرات تتحرك مبتعدةً عنا. تناول هابل ٤٦ مجرة تُعرف باحتوائها على نجوم قيفاوية، مما يجعل استنتاج مسافاتها أمرًا ممكنًا، ورسم مخططًا للنتائج مقابل مقدار الانزياح الأحمر. كان ما حصل عليه خطًّا مستقيمًا، مما يشير إلى أنَّ المجرة تتراجع بسرعة تتناسب طرديًّا مع مسافتها. وفي عام ١٩٢٩، ذكر هذه العلاقة في صيغة رياضية تُعرَف الآن بقانون هابِل. ويُعرف ثابت التناسب بثابت هابل، وهو يبلغ ٧٠ كيلومترًا/الثانية لكل كيلو فرسخ فلكي. غير أنَّ التقدير الأولي لهابل كان يبلغ سبعة أضعاف هذه القيمة.

الواقع أنَّ عالِم الفلك السويدي كنوت لوندمارك تناول الفكرة نفسها عام ١٩٢٤؛ أي قبل هابل بخمس سنوات. واستخدم الأحجام الظاهرية للمجرات لاستنتاج مدى المسافة التي تبعدها، وكانت القيمة التي توصَّل إليها لثابت «هابل» تختلف عن القيمة التي نعرفها اليوم بمقدار ١٪، وذلك أفضل كثيرًا من القيمة التي توصَّل إليها هابل. بالرغم من ذلك، فقد أُهمِل عمله لأنه لم يخضع للمراجعة باستخدام قياسات مستقلة.

والآن، صار بإمكان علماء الفلك تقدير المسافة التي يبعدها أيُّ جسم من خلال طيفه، إذا تمكَّنوا من تحديدِ ما يكفي من الخطوط الطيفية للاستدلال على الانزياح نحو الأحمر. تبدو ظاهرة الانزياح الأحمر في جميع المجرات بالفعل؛ ولهذا نستطيع حساب المسافة التي تبعدها عنا. وجميعها يتحرك مبتعدًا عنَّا. وبهذا؛ فإما أن تكون الأرض موجودة في مركز منطقة ضخمة تتمدد، مما ينافي مبدأ كوبرنيكوس القائل بعدم تميزنا، وإما أنَّ الكون بأكمله يتمدد، وحتى الكائنات الفضائية في مجرة أخرى سيلاحظون السلوك نفسه.

كان اكتشاف هابل دليلًا على بيضة لومتر الكونية. ذلك أننا إذا عدنا بكون متمدد في الزمن إلى الوراء، فسوف يتكثف بأكمله في نقطة واحدة. إنَّ إعادة الزمن إلى اتجاهه المعتاد، تخبرنا بأنَّ الكون قد بدأ ولا بد في صورة نقطة واحدة. لم ينبثق الكون من بيضة؛ بل «هو» نفسه بيضة. تظهر البيضة من العدم وتنمو. وظهر كلٌّ من المكان و«الزمان» إلى الوجود من العدم، وفور ظهورهما، يتطور الكون الذي نحيا فيه اليوم.

حين أدَّت ملاحظات هابل إلى اقتناع أينشتاين بأنَّ لومتر كان محقًّا تمامًا، أدرك أنه كان يمكن أن «يتنبأ» بالتمدد الكوني. فقد كان من الممكن تعديل حله الثابت إلى آخر متمدد، وكان التمدد سيمنع الانهيار الجذبوي. وكان ذلك الثابت الكوني المزعج Λ غير ضروري؛ فقد كان دوره أن يدعم نظرية غير صحيحة. حذف أينشتاين Λ من نظريته، وقال لاحقًا إنَّ تضمينه كان خطأه الأكبر.

نتج عن هذا العمل كله نموذج قياسي لهندسة الزمكان في الكون، وهي مترية «فريدمان–لومتر–روبرتسون–ووكر»، التي وُضِعَت معًا في ثلاثينيات القرن العشرين. وهي في حقيقة الأمر عائلة من الحلول يقدِّم كلٌّ منها هندسة محتملة. تتضمن المترية معاملًا يحدِّد الانحناء، وقد يكون صفرًا أو موجبًا أو سالبًا. جميع الأكوان في هذه العائلة متجانسة (تتطابق في جميع النقاط) ومتناحية (تتطابق في جميع الاتجاهات)، وتلك هي الظروف الأساسية التي افتُرِضَت لاشتقاق الصيغة. يمكن للزمكان أن يكون متمددًا أو متقلصًا، ويمكن أن تكون طوبولوجيته بسيطة أو معقدة. إضافةً إلى ذلك، تتضمن المترية أيضًا ثابتًا كونيًّا اختياريًّا.

لأنَّ الزمن يأتي إلى الوجود مع الانفجار العظيم، فما من حاجة منطقية لقولِ ما حدث من «قبل». فلم «يكن» ثمَّة قبلُ. كانت الفيزياء مستعدة لهذه النظرية الجذرية؛ إذ توضح ميكانيكا الكم أنَّ الجسيمات قد تظهر فجأة من العدم. إذا كان لجسيم أن يفعل هذا، فلماذا لا يفعله كون؟ إذا كان للمكان أن يفعلها، فلماذا لا يفعلها الزمان؟ يعتقد علماء الكونيات الآن أنَّ هذا الرأي صحيح في جوهره، لكنهم بدءوا يتساءلون عمَّا إذا كان من الممكن نبذ «قبل» بتلك السهولة. تسمح الحسابات الفيزيائية المفصلة ببناء جدول زمني معقَّد دقيق للغاية، يشير إلى ظهور الكون للوجود قبل ١٣٫٨ مليار عام في صورة نقطة واحدة، وهو يتمدد منذ ذلك الوقت.

من السمات المثيرة للاهتمام في الانفجار العظيم أنَّ المجرات المنفردة، وحتى عناقيدها المقيَّدة بالجاذبية، «لا» تتمدد. ذلك أننا نستطيع تقدير أحجام المجرات البعيدة، والتوزيع الإحصائي للأحجام يكاد يكون مطابقًا لما هو عليه في المجرات القريبة. وما يحدث أغرب كثيرًا. فمقياس مسافة «المكان» يتغير. تبتعد المجرات بعضها عن بعض بسبب ظهور المزيد من المكان فيما بينها، لا لأنها تتحرك في الاتجاه المعاكس على مقدار ثابت من المكان.

يؤدي ذلك إلى نتائج تنطوي على بعض المفارقات. فالمجرات التي تبعد عنا بما يزيد عن ١٤٫٧ مليار سنة ضوئية تتحرك بسرعة كبيرة للغاية حتى إنها تتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء بالنسبة إلينا. بالرغم من ذلك، لا يزال بإمكاننا أن نراها.

ثمَّة أمور ثلاثة تبدو خاطئة في هذه المزاعم. إذا كان عمر الكون ١٣٫٨ مليار عام فحسب، وكان في الموقع نفسه في بادئ الأمر، فكيف لأي شيء أن يقع على مسافة ١٤٫٧ مليار سنة ضوئية؟ لا بد أن يتحرك بسرعة أكبر من الضوء، وهو ما تمنعه النسبية. ولهذا السبب نفسه، لا يمكن للمجرات أن تتحرك الآن بسرعة تتجاوز سرعة الضوء. وأخيرًا، لو أنها تفعل ذلك، لما استطعنا أن نراها.

ولكي نفهم السبب في منطقية هذه المزاعم، لا بد أن نفهم عن النسبية ما هو أكثر قليلًا. فبالرغم من أنها تمنع تحرك المادة بسرعة أكبر من الضوء، فإنَّ ذلك الحد ينطبق بالنسبة إلى المكان المحيط. فالنسبية لا تمنع «تحرك» المكان بسرعة أكبر من الضوء. وبهذا؛ يمكن لمنطقة من المكان أن تتجاوز سرعة الضوء، بينما تبقى المادة الموجودة بداخلها أقل من سرعة الضوء بالنسبة إلى المكان الذي يضمها.[3] وقد تكون المادة ساكنة في حقيقة الأمر بالنسبة إلى مكانها المحيط، بينما يسرع المكان بسرعة تبلغ ١٠ أضعاف سرعة الضوء. إنَّ ذلك مشابه تمامًا لما يحدث حين نجلس في سلام وراحة نشرب القهوة ونقرأ جريدة داخل طائرة ركاب نفاثة تتحرك بسرعة ٧٠٠ كيلومتر في الساعة.

تلك أيضًا هي الكيفية التي أصبحت بها تلك المجرات على مسافة ١٤٫٧ مليار عام. فهي لم تتحرك تلك المسافة بأكملها. وإنما زاد مقدار المكان بيننا وبينها.

وأخيرًا، علينا أن ندرك أيضًا أنَّ الضوء الذي نرصد به هذه المجرات البعيدة، ليس بالضوء الذي ينبعث منها في الوقت الحالي.[4] إنه الضوء الذي انبعث منها في الماضي، حين كانت أقرب إلينا. وهذا هو السبب في أنَّ الكون القابل للرصد أكبر مما قد نتوقع.

ربما ترغب في تناول القهوة وقراءة جريدة بينما تفكر في هذا.

ثمَّة نتيجة أخرى أيضًا مثيرة للاهتمام.

وفقًا لقانون هابل، تكون درجة الانزياح نحو الأحمر أكبر في المجرات البعيدة؛ ومن ثمَّ فلا بد أنها تتحرك بسرعة أكبر. للوهلة الأولى، يبدو ذلك غير متسق مع مترية «فريدمان–لومتر–روبرتسون– ووكر»، التي تتنبأ بأنَّ معدل التمدد ينبغي أن يتباطأ بمرور الوقت. بالرغم من ذلك، علينا أن نفكِّر في سياق نظرية النسبية. كلما زادت المسافة التي تبعدها إحدى المجرات عنا، استغرق ضوءُها فترة أطول في الوصول إلينا. ولهذا،

فإنَّ انزياحه الأحمر في الوقت «الحالي»، يشير إلى سرعته المتجهة في «الماضي». وبهذا، يشير قانون هابل إلى أننا كلما نظرنا إلى وقتٍ أبعد في الماضي، زادت السرعة التي يتمدد بها الفضاء. معنى هذا أنَّ التمدد كان سريعًا في البداية، ثم تباطأ بما يتوافق مع مترية «فريدمان-لومتر-روبرتسون- ووكر».

يصبح ذلك منطقيًّا تمامًا إذا كان التمدد منقولًا في الانفجار العظيم الأولي. فحين بدأ الكون في النمو، بدأت جاذبيته في تقليصه مجددًا. تشير الملاحظات إلى أنَّ ذلك ما كان يحدث حتى خمسة مليارات عام تقريبًا. تستند هذه الملاحظات على قانون هابل الذي يخبرنا بأنَّ معدل التمدد يزيد بمقدار ٢١٨ كيلومترًا في الثانية لكل مليون سنة ضوئية إضافية في المسافة. معنى هذا أنه يزيد بمقدار ٢١٨ كيلومترًا في الثانية لكل مليون سنة في الماضي؛ ومن ثمَّ فقد قلَّ بمقدار ٢١٨ كيلومترًا في الثانية لكل مليون عام بعد الانفجار العظيم.

سنرى في الفصل السابع عشر أنَّ هذا البطء في التمدد قد انعكس على ما يبدو؛ أي أنه يسرع من جديد، لكننا سنؤجل مناقشة ذلك الآن.

كانت الخطوة التالية هي التوصُّل إلى أدلة مستقلة تؤيد الانفجار العظيم. في عام ١٩٤٨، تنبأ رالف ألفر وروبرت هرمان بأنَّ الانفجار العظيم ينبغي أن يكون قد ترك بصمة على مستويات الإشعاع في الكون على صورة إشعاع خلفية كونية ميكروي متساوٍ. وفقًا لحساباتهما، تبلغ درجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي؛ أي درجة حرارة المصدر الذي كان يمكن أن ينتج ذلك المستوى من الإشعاع، ٥ درجات كلفنية تقريبًا. وفي ستينيات القرن العشرين، اكتشف كلٌّ من ياكوف زيلدوفيتس وروبرت دايكي هذه النتيجة نفسها من جديد وعلى نحوٍ مستقل. وفي عام ١٩٦٤، أدرك عالما الفيزياء الفلكية إيه جي دوروشكيفيتش وإيجور نوفيكوف، أنَّه يمكن من الناحية النظرية رصد إشعاع الخلفية الكونية الميكروية لاختبار نظرية الانفجار العظيم.

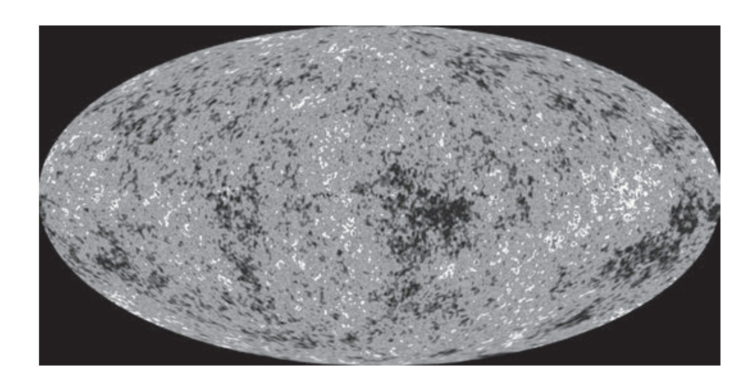
وفي السنة نفسها، بدأ ديفيد ويلكينسون وبيتر رول، وهما زميلان لدايكي، بناء مقياس إشعاع دايكي لقياس إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. هذا مستقبل راديوي يستطيع قياس متوسط قوة إشارةٍ ما في نطاق من الترددات. بالرغم من ذلك، فقد سبقهما فريق آخر في بنائه قبل أن يتمكنا من إنهاء العمل فيه. وفي عام ١٩٦٥، استخدم أرنو بينزياس وروبرت ويلسون مقياس إشعاع دايكي لبناء واحد من أولى التلسكوبات

الراديوية. في أثناء التقصي عن مصدر «ضوضاء» مستمر، أدركا أنَّ منشأه كوني، لا عطلًا في معداتهما. لم يكن للضوضاء موقع محدد؛ بل كانت موزعة بالتساوي على السماء بأكملها. وبلغت درجة حرارتها ٤٫٢ درجات كلفنية تقريبًا. كان ذلك أول رصد لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي.

كان تفسير إشعاع الخلفية الكونية الميكروي موضع نقاشات حامية في ستينيات القرن العشرين، واقترح الفيزيائيون الذين كانوا يفضلون نظرية الحالة الثابتة أنه ضوء نجوم متناثر من المجرات البعيدة. غير أنه بحلول العام ١٩٧٠ صار إشعاع الخلفية الكونية الميكروي دليلًا واسع القبول على نظرية الانفجار العظيم. وصف هوكينج هذه الملاحظة بأنها: «المسمار الأخير في نعش نظرية الحالة الثابتة.» كانت النقطة الحاسمة هي طيف ذلك الإشعاع الذي بدا كإشعاع الجسم الأسود تمامًا، على عكس ما تقول به نظرية الحالة الثابتة. يعتقد العلماء الآن أنَّ إشعاع الخلفية الكونية الميكروي من بقايا الكون حين كان عمره ٣٧٩٠٠٠ عام. في ذلك الوقت، انخفضت درجة حرارته إلى ٣٠٠٠ درجة كلفنية، مما أتاح للإلكترونات الاتحاد مع البروتونات لتكوين ذرات الهيدروجين. أصبح الكون شفافًا للإشعاع المغناطيسي. ليكن هناك ضوء!

تتنبأ النظرية بأنَّ إشعاع الخلفية الكونية الميكروي لا ينبغي أن يكون متساويًا تمامًا في جميع الاتجاهات. وإنما ينبغي أن توجد بعض التقلبات، تُقدَّر بما يتراوح بين ٠٫٠٠١ و٠٫٠١٪. في عام ١٩٩٢ قامت بعثة «مستكشف الخلفية الكونية» (COBE) بقياس هذه التقلبات غير المتجانسة. واتضح تركيبها التفصيلي بدرجة أكبر من خلال «مسبار ويلكينسون لتباين الأشعة الميكروية». وقد أصبحت هذه التفاصيل هي الطريقة الأساسية لمقارنة الواقع بتنبؤات النسخ المختلفة لنظرية الانفجار العظيم، وغيرها من التصورات الكونية.

حين سافرت عائلتي إلى فرنسا قبل بضع سنوات، سُرِرنا برؤية علامة إرشادية لمطعم «ريستورو يونيفير» (مطعم الكون). وبخلاف ابتكار دوجلاس آدامز الخيالي، «ذا ريستورانت آت ذا إند أوف ذا يونيفيرس»، الذي يقع إلى الأبد على حافة النقطة النهائية في الزمان والمكان، فقد كان ذلك مطعمًا عاديًّا تمامًا تابعًا لفندق «أوتيل يونيفير». وكان هذا بدوره فندقًا عاديًّا تمامًا في مدينة ريمس يقع في النقطة المناسبة من المكان والزمان لأربعة من المسافرين المرهقين الجوعى.



إشعاع الخلفية الكونية الميكروي بقياس «مسبار ويلكينسون لتباين الأشعة الميكروية». توضح الخريطة تقلبات درجة الحرارة بعد فترة قصيرة من الانفجار العظيم، وهي بذور عدم الانتظام التي نمت لتكون المجرات. تختلف درجات الحرارة عن المتوسط بمقدار ٢٠٠ جزء من مليون درجة كلفنية فحسب.

كانت المسألة العلمية التي حفزت ابتكار مطعم آدامز الخيالي هي: كيف سينتهي الكون؟ لن ينتهي بحفلة لموسيقى الروك ذات أبعاد كونية، وإن كانت هذه هي إجابته. ربما تكون تلك نهاية ملائمة للبشرية، لكنها قد لا تكون نهاية يمكن أن نلحقها بأي حضارة أخرى ربما توجد في الكون.

ربما لن ينتهي على الإطلاق. فقد يستمر في التمدد إلى الأبد. غير أنه إذا حدث ذلك، فسوف يتعطل كل شيء ببطء؛ ستباعد المجرات بعضها عن بعض حتى إنَّ الضوء لا يستطيع المرور بينها، وسنبقى وحيدين في البرد والظلام. بالرغم من ذلك، يرى فريمان دايسون أنَّ «الحياة» المعقدة قد تستمر في الوجود بالرغم من ذلك «الموت الحراري» للكون. غير أنها ستكون حياة «بطيئة» للغاية.

ثمَّة بديل أقل تخييبًا لآمال محبي الخيال العلمي، وهو أنَّ الكون قد ينهار في انفجار عظيم عكسي. ربما ينهار حتى إلى نقطة واحدة. وربما تكون نهايته أكثر فوضوية من ذلك؛ فينتهي بـ «انسحاق عظيم» تتمزق فيه المادة على صورة طاقة مظلمة تقطِّع نسيج الزمكان.

ربما تكون تلك النهاية. غير أنه من الممكن أيضًا أن يظهر الكون إلى الوجود من جديد بعد الانهيار. تلك هي نظرية الكون المتذبذب. وقد استخدمها جيمس بليش في نهاية قصته «تصادم الصنوج». قد تكون الثوابت الأساسية في الفيزياء بعد الظهور الجديد؛

فبعض الفيزيائيين يعتقدون ذلك. وبعضهم لا يعتقد بذلك. وربما سيُنتِج كوننا أطفالًا يشبهون أمَّهم تمامًا، أو يختلفون عنها تمامًا. وربما لا يفعل.

تسمح لنا الرياضيات باستكشاف كل هذه الاحتمالات، وقد تساعدنا ذات يوم على اختيار أحدها. غير أننا لا نستطيع حتى الآن سوى تخمين نهاية الكون، أو ربما عدم انتهائه؛ إذ ربما يكون الأمر كذلك.

الفصل السابع عشر

الانتفاخ الكبير

«لو أنني كنت حاضرًا عند الخلق، لقدمت بعض الإرشادات المفيدة لترتيب الكون على نحوٍ أفضل.»

ألفونسو الحكيم، «ملك قشتالة» (منسوبة إليه)

قبل بضع سنوات، كانت نظرية الانفجار العظيم عن نشأة الكون تلائم جميع الملاحظات المهمة. وتنبأت على وجه التحديد بدرجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، وكان ذلك نجاحًا مبكرًا للنظرية ساهم بدرجة كبيرة في قبولها.[1] ومن ناحية أخرى، كانت الملاحظات قليلة وتأتي على فترات متباعدة. فمع حصول علماء الفلك على قياسات أكثر تفصيلًا، وقيامهم بالحسابات الأكثر استفاضة لمعرفةِ ما تتنبأ به نظرية الانفجار العظيم، بدأت التباينات في الظهور.

رأينا في الفصل الخامس عشر أنَّ كون اليوم يحتوي على الكثير من البُنى الكبيرة النطاق؛ إذ توجد به شعيرات ضخمة وصفائح من المجرات تحيط بها مساحات أضخم من الفراغ، أشبه بالرغوة في كوب البيرة؛ حيث تمثل المجرات أسطح الفقاعات، بينما تمثل مساحات الفراغ الهواء الموجود بداخلها. تشير الحسابات إلى أنَّ التقدير الحالي لعمر الكون هو ١٣٫٨ مليار عام؛ مما لا يعطي المادة وقتًا كافيًا لتصبح بالتكتل الذي هي عليه اليوم. وهو أيضًا وقت أقصر كثيرًا من أن يفسِّر الاستواء الحالي للمكان. والواقع أنَّ إصلاح الأمرين مهمة صعبة؛ لأنه كلما زاد استواء المكان قلت احتمالية تكتل المادة، وكلما زاد تكتل المادة زاد انحناء المكان.

يتمثل الرأي السائد في علم الكونيات لحل هذه المعضلة في افتراض انفجار أكبر، يُعرف بالتضخم. ففي نقطة تحول حاسمة في مرحلة مبكرة للغاية من وجوده، تمدد الكون الوليد إلى حجم ضخم في وقت قصير للغاية.

ثمَّة عيوب أخرى في نظرية الانفجار العظيم الأصلية أدت بعلماء الكونيات إلى اقتراح افتراضين آخرين؛ المادة المظلمة، وهي نوع من المادة يختلف كليًّا عن المادة المعتادة، والطاقة المظلمة، وهي شكل من الطاقة يتسبَّب في إسراع تمدد الكون. وفي هذا الفصل، سأناقش التضخم والمادة المظلمة. وسوف أرجئ الحديث عن الطاقة المظلمة إلى الفصل التالي؛ إذ يوجد الكثير مما يُقال عنها.

يثق علماء الكونيات كثيرًا في النظرية الحالية، التي تُعرف باسم (ΛCDM) نموذج (لامدا للمادة المظلمة الباردة) أو النموذج القياسي لعلم الكونيات. (تذكر أنَّ Λ هو رمز ثابت أينشتاين الكوني.) وهم يشعرون بهذه الثقة لأنَّ التوليفة المتمثلة في نظرية الانفجار العظيم الكلاسيكية والتضخم والمادة المظلمة والطاقة المظلمة، تتفق مع معظم المشاهدات الرصدية بدرجة كبيرة من التفصيل. بالرغم من ذلك، توجد بعض المشكلات المهمة في هذه الإضافات الثلاث قد تحتاج إلى إعادة التفكير.

في هذا الفصل والذي يليه، سأبدأ بوصف النظريات التقليدية موضحًا الملاحظات الرصدية التي حفزت ظهور الإضافات الثلاثة، مع توضيح كيفية تفسير هذه الإضافات الثلاثة للملاحظات. وسنتبنى بعد ذلك نظرة نقدية تجاه النموذج القياسي لعلم الكونيات الناتج عنها، مع توضيح بعض المشكلات التي لم تزل قائمة. وأخيرًا، سأصف بعض ما اقتُرِح للنموذج القياسي من بدائل، وسنرى مدى نجاحها مقارنةً به.

تناول الفصل السادس عشر الدليل الأساسي على نظرية الانفجار العظيم، بما في ذلك إضافاتها: تركيب خلفية الأمواج الميكروية الكونية. يوضح أحدث القياسات من مسبار «ويلكينسون لتباين الأشعة الميكروي» أنَّ إشعاع الخلفية الكونية الميكروي متساوٍ «تقريبًا»، فهو يختلف عن المتوسط بما لا يزيد عن ٢٠٠ جزء من المليون درجة كلفنية. وبالرغم من أنَّ نظرية الانفجار العظيم تتنبأ بتقلبات صغيرة، فإنَّ هذه التقلبات صغيرة «جدًّا»، مما لا يمنح التكتل الحالي للكون الوقت الكافي للتطور. ويستند هذا الزعم على نماذج المحاكاة الحاسوبية للنماذج الرياضية لتطور الكون، والتي ذُكِرَت في الفصل الخامس عشر.

من الطرق التي يمكن استخدامها لحل هذه المشكلة تعديل النظرية بحيث يكون الكون المبكر أكثر تكتلًا من البداية. غير أنَّ هذه الفكرة تواجه مشكلة ثانية، تكاد تكون معاكسة للأولى. فبالرغم من أنَّ «المادة» الموجودة حاليًّا أكثر تكتلًا بما لا يتلاءم مع الانفجار العظيم القياسي، فإنَّ «الزمكان» ليس متكتلًا بالدرجة الكافية. فهو مستوٍ تقريبًا.

كان علماء الكونيات قلقين أيضًا بشأن مشكلة أعمق، وهي مشكلة الأفق التي أشار إليها ميسنر في ستينيات القرن العشرين. ذلك أنَّ نظرية الانفجار العظيم القياسية تتنبأ بأنَّ أجزاء الكون البعيدة للغاية بعضها عن بعض بما لا يسمح بأن يكون لها تأثير سببي بعضها على بعض، ينبغي بالرغم من ذلك أن يكون توزيع المادة وتوزيع درجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي متشابهين بها. وعلاوةً على هذا، ينبغي أن يصبح ذلك واضحًا للراصِد لأنَّ الأفق الكوني — المدى الذي يستطيعون رؤيته — يزيد مع مرور الوقت. ومن ثمَّ؛ فالمناطق التي لم تكن متصلة سببيًّا قبل ذلك، ستتصل بعد ذلك. وحينها يكون السؤال: كيف «تعرف» هذه المناطق توزيع المادة ودرجة الحرارة الذي ينبغي أن تتسم به؟ إذن، فليست المشكلة أنَّ الزمكان مستوٍ للغاية فحسب؛ بل إنَّه أيضًا مستوٍ «بالتساوي» على مناطق أكبر كثيرًا من أن تكون قد تواصلت بعضها مع بعض.

في عام ١٩٧٩، توصَّل ألان جوث إلى فكرة بارعة تحل المشكلتين معًا. فهي تجعل الزمكان مستويًا، بينما تسمح للمادة بأن تظل متكتلة، وهي تحل مشكلة الأفق. ولكي نصف هذه الفكرة، ينبغي أن نتعرف على طاقة الفراغ.

في فيزياء اليوم، لا يمثل الفراغ مكانًا خاليًا فحسب. وإنما هو مرجل يفور بالجسيمات الكمومية الافتراضية، التي تظهر من العدم في أزواج، ثم يلغي أحدها الآخر قبل أن يتمكَّن أيُّ أحد من رصدها. إنَّ ذلك ممكن الحدوث في ميكانيكا الكم بسبب مبدأ اللايقين الذي وضعه هايزنبرج، والذي يقول بأننا لا نستطيع رصد طاقة جسيمٍ ما في وقت محدَّد. لا بد أن تكون الطاقة غير محددة، أو تكون الفترة الزمنية غير محددة. إذا كانت الطاقة غير محددة، فلا يلزم أن تُحفَظ في كل ثانية. يمكن للجسيمات أن تقترض الطاقة، ثم تردها في تلك الفترة الزمنية الوجيزة. إذا كان الزمن غير محدد، فإنَّ غيابه لن يُلحَظ.

وهذه العملية — أو ربما شيء آخر؛ فالفيزيائيون غير متيقنين — تخلق مجالًا جياشًا من طاقة الخلفية في كل مكان في الكون. إنَّ هذه الطاقة صغيرة، فهي تبلغ جزءًا واحدًا على المليار من الجول لكل متر مكعب. وهي تكفي لتشغيل قضيب مدفأة كهربائية لجزء على التريليون من الثانية.

تقترح نظرية التضخم أنَّ مناطق الزمكان التي تفصلها مسافات شاسعة، تتسم بتوزيع المادة ودرجة الحرارة نفسه لأنها «كانت» قادرة في الماضي على التواصل بعضها مع بعض. افترض أنَّ مناطق الكون البعيدة بعضها عن بعض في الوقت الحالي كانت قريبة من قبل بالدرجة الكافية للتفاعل. افترض أيضًا أنَّ طاقة الفراغ في ذلك الوقت كانت أكبر مما هي عليه الآن. في تلك الحالة، لا يزيد الأفق القابل للرصد؛ بل يظل ثابتًا. إذا مرَّ الكون آنذاك بتمدد سريع، فإنَّ الراصدين القريبين ينفصلون بسرعة، ويصبح كل شيء متجانسًا. وبصفة جوهرية، فإنَّ أي ارتفاع موضعي أو انخفاض كان يوجد قبل بدء التضخم، يتمدد فجأة ليغطي مقدارًا شديد الضخامة من الزمكان. فالأمر يشبه وضع قطعة من الزبد على شريحة صغيرة من الخبز، ثم جعل شريحة الخبز ضخمة الحجم فجأة. ينتشر الزبد على شريحة الخبز، وتحصل على طبقة رقيقة من الزبد ومتساوية تقريبًا.

لا تحاول فعل ذلك في المنزل.

إنَّ البداية المبكرة للغاية والانفجار السريع كليهما ضروريان لكي تكون حسابات التضخم صحيحة. إذن فما الذي يسبِّب هذا النمو السريع، ذلك الانفجار الأضخم من الانفجار العظيم الضعيف الذي بدأ كل شيء؟ والإجابة هي مجال ما متضخم؛ inflaton. ليس ذلك خطأً مطبعيًّا: فالمتضخم هو جسيم افتراضي. في النظرية الكمومية، توجد الجسيمات والمجالات جنبًا إلى جنب. والجسيم هو كتلة موضعية في المجال، والمجال هو بحر متدفق من الجسيمات.

تساءل جوث عمَّا سيحدث إذا كان المكان ممتلئًا بالتساوي بمجال كمومي غير ملحوظ، هو مجال المتضخم الافتراضي. أوضحت حساباته أنَّ مثل ذلك المجال يولِّد ضغطًا سالبًا؛ أي أنه ينتج دفعة إلى الخارج. يقترح براين جرين تشبيه الأمر بغاز ثاني أكسيد الكربون في زجاجة الشامبانيا. فحين تنزع السدادة يتمدد الغاز بسرعة كبيرة، مما يولِّد تلك الفقاقيع المحببة. وإذا نزعت سدادة الكون، فإنَّ مجال المتضخم يتمدد بسرعة أكبر وأكبر. التعديل الجديد أننا لا نحتاج إلى سدادة؛ بل يمكن للزجاجة بأكملها (الكون) أن تتمدد بسرعة كبيرة وبمقدار ضخم للغاية. تقول النظرية الحالية في الفترة ما بين $١٠^{-٣٦}$ و$١٠^{-٣٢}$ ثوانٍ بعد الانفجار الكبير، تضاعف حجم الكون بعامل $١٠^{٧٨}$ على الأقل.

الخبر الجيد أنَّ تصور التضخم، وتحديدًا بعض التنويعات العديدة التي وردت على الفكرة الأصلية منذ اقتراحها، يتفق مع الكثير من الملاحظات. وليس ذلك مفاجئًا تمامًا؛

لأنها صُمِّمَت لتوافق بعض الملاحظات الأساسية، لكنَّ ما يبعث على الثقة أنها تتفق مع العديد غيرها أيضًا. هل أُنجزت المهمة إذن؟ حسنًا، ربما لم تُنجز بعد؛ لأنَّ الخبر السيئ أنَّ أحدًا لم يكشف عن جسيم متضخم قط، ولا عن أي أثر للمجال الذي يُفترض أنه يدعمه. إنه أرنب كمومي لم يُستخرَج بعد من القبعة الكونية، لكنه سيكون أرنبًا جذابًا للغاية إذا أمكن إقناعه أن يبرز أنفه المرتجف من حافة القبعة.

بالرغم من ذلك، فقد بدأ يصبح أقل جاذبية بكثير في السنوات الأخيرة. فمع طرح الفيزيائيين وعلماء الكونيات أسئلة أعمق بشأن التضخم، ظهرت المشكلات. ومن أكبر هذه المشكلات التضخم الأبدي الذي اكتشفه ألكسندر فيلينكين. يفترض التفسير المعتاد لبنية كوننا أنَّ مجال المتضخم يعمل مرة واحدة في فترة مبكرة للغاية من تطور الكون، ثم «يظل» مغلقًا. بالرغم من ذلك، إذا كان لمجال المتضخم وجود على الإطلاق، فيمكن أن يعمل في أي مكان وأي وقت. تُعرف هذه النزعة بالتضخم الأبدي. وهي تشير إلى أنَّ منطقة كوننا ليست سوى فقاعة واحدة متضخمة في حمام فقاعات من الرغوة الكونية، وقد تبدأ فترة جديدة من التضخم في غرفة معيشتك بعد العصر، وتؤدي إلى انتفاخ تلفازك وقطتك[2] بمعامل $١٠^{٧٨}$.

توجد طرق لإصلاح هذه المشكلة باستخدام تنويعات على فكرة جوث الأصلية، لكنها تستلزم شروطًا مبدئية مميزة على نحو استثنائي لتطور كوننا. يمكن استنتاج مدى تميز هذه الشروط من حقيقة أخرى مثيرة للاهتمام تتمثَّل في وجود شروط مبدئية أخرى مميزة تؤدي إلى ظهور كون مثل كوننا تمامًا «بدون» حدوث التضخم. كلا النوعين من الشروط نادر، لكن ليس بالدرجة نفسها. أوضح روجر بنروز[3] أنَّ عدد الشروط المبدئية التي تنتج كوننا دون استدعاء التضخم يفوق عدد تلك التي تنتج التضخم بعامل يبلغ مقداره جوجل بلكس واحد أي $١٠^{١٠^{١٠٠}}$. وبهذا، فإنَّ تفسير الحالة الحالية للكون الذي «لا» يستدعي التضخم، أكثر وجاهة بدرجة كبيرة للغاية من تفسير يستدعيه. لقد استخدم بنروز نهج الديناميكا الحرارية ولست متأكدًا من أنَّ ذلك ملائم في هذا السياق، لكنَّ جاري جيبونز ونيل توروك استخدما طريقة مختلفة: عكس الزمن وتفكيك الكون إلى حالته الأولية. ومرة أخرى، نجد أنَّ الغالبية العظمى من مثل تلك الحالات لا تتضمن التضخم.

لا يزال معظم علماء الكونيات على قناعةٍ بأنَّ نظرية التضخم صحيحة في جوهرها؛ لأنَّ تنبؤاتها تتفق مع الملاحظات على نحوٍ جيد جدًّا. وسيكون من المبكر استبعادها بسبب

الصعوبات التي ذكرتها. بالرغم من ذلك، فإنَّ هذه الصعوبات تشير بقوة إلى أنَّ المفهوم الحالي عن التضخم ينطوي على عيوب خطيرة. ربما يرشدنا إلى الاتجاه الصحيح، لكنه لا يمثل الإجابة النهائية بأية حال من الأحوال.

ثمَّة مشكلتان أخريان بشأن النموذج القياسي لنشأة الكون. أولى هاتين المشكلتين نوقشت في الفصل الثاني عشر، وهي أنَّ المناطق الخارجية من المجرات تدور حول محورها بسرعة أكبر كثيرًا مما يسمح بتماسكها إذا كانت جاذبية نيوتن تنطبق عليها (أو جاذبية أينشتاين مثلما يُعتَقد غالبًا). والإجابة القياسية لهذه المشكلة هي المادة المظلمة التي نناقشها بالتفصيل في الفصل التالي.

أما المشكلة الثانية، فتتمثَّل في الكيفية التي يتغير بها معدل تمدد الكون بمرور الوقت. فقد كان علماء الكونيات يتوقعون أن يظل المعدل ثابتًا مما يؤدي إلى كون «مفتوح» لا يتوقف أبدًا عن النمو، أو أن يبطئ المعدل بينما تسحب الجاذبية المجرات المتمددة معًا من جديد لتشكيل كون «مغلق». بالرغم من ذلك، ففي عام ١٩٨٨، أوضحت ملاحظات «فريق البحث عن المستعرات العظمى العالية الانزياح» للانزياح نحو الأحمر في المستعرات العظمى من نوع Ia أنَّ التمدد «يسرع». فاز عمل الفريق بجائزة نوبل في الفيزياء عام ٢٠١١، وكانت النتيجة الفعلية غير خلافية على وجه التحديد (على عكس التضخم والمادة المظلمة). أما ما كان خلافيًّا فهو تفسيرها.

يعزو علماء الكونيات التمدد المتسارع للكون إلى مصدر للطاقة يطلقون عليه مصطلح «الطاقة المظلمة». يتمثَّل أحد الاحتمالات في ثابت أينشتاين الكوني Λ. فعند إدخال قيمة موجبة للثابت Λ في المعادلات ينتج لدينا معدل التسارع المرصود. إذا كان هذا صحيحًا، فسيتضح أنَّ وضع الثابت الكوني في معادلات المجال ليس بخطأ أينشتاين الأكبر؛ بل إلغاؤه من المعادلات هو الخطأ الأكبر. لكي يتفق الثابت الكوني مع الملاحظات، يجب أن تكون قيمته صغيرة للغاية: $١٠^{-٢٩}$ من الجرامات تقريبًا لكل سنتيمتر مكعب عند التعبير عن الطاقة في صورة كتلة من خلال معادلة أينشتاين الشهيرة: الطاقة = الكتلة × مربع سرعة الضوء $E = mc^2$.

ينبع أحد الأسباب الفيزيائية التي تقضي بوجوب أن يكون الثابت الكوني أكبر من الصفر من ميكانيكا الكم: طاقة الفراغ. تذكَّر أنَّ هذه الطاقة هي تأثير طبيعي طارد ينتج عن ظهور أزواج الجسيم/الجسيم المضاد إلى الوجود، ثم إلغاء بعضها بعضًا بسرعة

كبيرة لا تسمح حتى بالكشف عن الجسيمات نفسها. المشكلة الوحيدة أنَّ قيمة طاقة الفراغ وفقًا لميكانيكا الكم التي نعرفها اليوم، ينبغي أن تكون أكبر من قيمة الثابت الكوني الذي يتلاءم مع معدل التسارع بمقدار $١٠^{١٢٠}$.

أشار الرياضي الجنوب أفريقي جورج إليس، إلى أنَّ وجود الطاقة المظلمة يُستنتَج من الملاحظات بافتراض أنَّ الكون يوصف على نحوٍ صحيح من خلال مترية «فريدمان-لومتر-روبرتسون-ووكر» القياسية، والتي يمكن (من خلال تغيير الإحداثيات) تأويل الثابت الكوني فيها على أنه الطاقة المظلمة. وقد رأينا أنَّ هذه المترية مشتقة من شرطين أساسيين، هما أنَّ الكون ينبغي أن يكون متجانسًا ومتناحيًا. أوضح إليس أنَّ انعدام التجانس يمكن أن يفسِّر الملاحظات دون افتراض وجود الطاقة المظلمة.[4] فالكون غير متجانس على فراغاته وتكتلاته، وهي أكبر كثيرًا من المجرات. من ناحية أخرى، يفترض النموذج الكوني القياسي أنَّ أوجه عدم التجانس تختفي على نطاق أكبر كثيرًا، مثلما تبدو الرغوة مصقولة إذا لم تنظر إليها بالقرب الكافي لرؤية الفقاعات. ولهذا، يقارن علماء الكونيات ملاحظات «فريق البحث عن المستعرات العظمى العالية الانزياح» بتنبؤات هذا النموذج المصقول.

الآن تظهر مشكلة رياضية دقيقة، يبدو أنها قد أُغفِلت حتى وقت قريب: هل الحل الدقيق للنموذج المصقول، قريب من الحل المصقول للنموذج الدقيق؟ يتناظر الأول مع النظرية السائدة، ويتناظر الثاني مع كيفية مقارنتنا له بالملاحظات. يتمثَّل الافتراض الضمني في أنَّ هذين العمليتين الرياضيتين تنتجان النتيجة نفسها تقريبًا، وتلك نسخة من افتراض النمذجة المستخدم بكثرة في الفيزياء الرياضية والرياضيات التطبيقية، الذي يقول بأنَّه يمكن إغفال الحدود الصغيرة في المعادلات دون أن يكون لذلك تأثير كبير على الحل.

غالبًا ما يكون ذلك الافتراض صحيحًا، لكن ليس دائمًا، وتشير بعض الدلائل إلى أنه قد يؤدي إلى نتائج خاطئة في هذه الحالة. فقد أوضح توماس بوخير[5] أنه عند حساب متوسط معادلات أينشتاين الخاصة بالتركيب المتكتل الصغير النطاق لاشتقاق معادلة للتركيب المصقول الكبير النطاق، تختلف النتيجة التي نحصل عليها عن نتيجة معادلات أينشتاين الخاصة بالنموذج المصقول الكبير النطاق. بدلًا من ذلك، يوجد بها حد إضافي، «تفاعل عكسي» طارد يخلق تأثيرًا يحاكي الطاقة المظلمة.

من الممكن أيضًا أن تُفسَّر الملاحظات الرصدية من المصادر الكونية البعيدة على نحوٍ خاطئ لأنَّ التأثير العدسي التثاقلي يمكن أن يركز الضوء ويجعله أكثر سطوعًا مما

ينبغي. إنَّ متوسط تأثير مثل ذلك التركيز، على جميع الأجسام البعيدة، هو المتوسط نفسه للنماذج المتكتلة التفصيلية الصغيرة النطاق، ومتوسطاتها الكبيرة النطاق، وهو ما يبدو مشجعًا للوهلة الأولى. غير أنَّ الأمر نفسه لا ينطبق على الأجسام الفردية، وهي ما نرصده. يصبح الإجراء الرياضي الصحيح في هذه الحالة هو حساب المتوسط على مسارات الضوء لا الفضاء المعتاد. وقد يؤدي عدم القيام بذلك إلى تغيير اللمعان الظاهر، ويتوقف المقدار الدقيق لهذا التغير على توزيع المادة. إننا لا نعرف ذلك بالدقة الكافية للتأكد مما يحدث. بالرغم من ذلك، يبدو أنَّ الدليل على تسارع تمدد الكون قد يكون غير جدير بالثقة لسببين متمايزين لكنهما مترابطان: قد تؤدي افتراضات الصقل المعتادة إلى نتائج خاطئة لكلٍّ من النظرية والملاحظات.

ثمَّة طريقة أخرى يمكن استخدامها لتفسير ملاحظات «فريق البحث عن المستعرات العظمى العالية الانزياح» دون استدعاء المادة المظلمة، وهي تعديل معادلات أينشتاين للمجال. ففي عام ٢٠٠٩، استخدم جويل سمولر وبليك تيمبل رياضيات الموجات الصدمية لإثبات أنَّ التعديل الطفيف على معادلات المجال يقدم حلًّا تتمدد فيه المترية بمعدل متزايد.[6] وسيفسِّر ذلك التسارع المرصود للمجرات دون استدعاء الطاقة المظلمة.

وفي عام ٢٠١١، في إصدار خاص من إحدى صحف «الجمعية الملكية» عن النسبية العامة، كتب روبرت كالدويل:[7] «حتى الآن، يبدو من المنطقي تمامًا أنَّ ملاحظات [المستعرات العظمى العالية الانزياح] يمكن أن تُفسَّر بقوانين جديدة للجاذبية.» ووصفت روث دورَر[8] الدليل على وجود الطاقة المظلمة بالضعيف قائلة: «إنَّ الدلالة الوحيدة على وجود الطاقة المظلمة تأتي من قياسات المسافات وعلاقتها بالانزياح نحو الأحمر.» فهي ترى أنَّ بقية الأدلة لا تثبت سوى أنَّ تقديرات المسافة من الانزياح نحو الأحمر أكبر من المتوقع في النموذج الكوني القياسي. فربما لا يكون التأثير المرصود هو التسارع، وحتى إذا كان كذلك، فما من سبب مقنع لافتراض أنَّ السبب هو الطاقة المظلمة.

بالرغم من أنَّ الاتجاه العام في علم الكونيات يستمر في التركيز على النموذج القياسي؛ أي نظرية الانفجار العظيم مثلما تصفها مترية (لامدا للمادة المظلمة الباردة) إضافةً إلى التضخم والمادة المظلمة والطاقة المظلمة، فإنَّ همسات عدم الرضا تتزايد منذ بعض الوقت. ففي مؤتمر عُقِد عن البدائل عام ٢٠٠٥، قال إريك ليرنر: «إنَّ تنبؤات الانفجار العظيم تخطئ باستمرار، وتُعدَّل بعد ذلك.» وكرَّر ريكاردو سكاربا هذا الرأي بقوله: «في كل مرة يعجز النموذج الأساسي للانفجار العظيم عن التنبؤ بما نراه، يكون الحل إضافة

شيء جديد عليه.»[9] كان كلا العالمين قد وقَّعا قبل ذلك بعام على خطاب مفتوح يحذِّر من أنَّ البحث في النظريات البديلة في علم الكونيات لا يحظى بالتمويل؛ مما يحد من الجدال العلمي.

ربما تكون تلك الشكاوى بدافع الغيرة فحسب، لكنها استندت إلى بعض الأدلة المقلقة، وليس محض اعتراضات فلسفية على هذه الإضافات الثلاث. فقد عثر تلسكوب «سبيتزر» الفضائي على مجرات تتسم بدرجة كبيرة من الانزياح نحو الأحمر حتى إن عمرها يعود إلى أقل من مليار عام بعد الانفجار الكبير. ومن ثمَّ؛ ينبغي أن تسود بها النجوم الزرقاء الحديثة الفائقة السخونة. غير أنها تحتوي على الكثير للغاية من النجوم الحمراء الباردة القديمة. ويشير هذا إلى أنَّ هذه المجرات أقدم مما تتنبأ به نظرية الانفجار العظيم؛ فلا بد إذن أنَّ الأمر نفسه ينطبق على الكون. مما يؤيد هذا أنَّ بعض النجوم اليوم تبدو أقدم من الكون. فهي عمالقة حمراء كبيرة للغاية حتى إنَّ الوقت اللازم لكي تحرق ما يكفي من الهيدروجين لتبلغ تلك الحالة أكبر كثيرًا من ١٣٫٨ مليار عام. إضافةً إلى ذلك، توجد عناقيد فائقة ضخمة من المجرات تتسم بدرجة عالية من الانزياح نحو الأحمر؛ أي أنها لم تكن ستحظى بالوقت الذي يسمح لها بتنظيم نفسها في تلك التراكيب الكبيرة. بالرغم من أنَّ هذا التأويل محل خلاف، فإنَّ الثالث على وجه التحديد يصعب تفسيره.

إذا كان الكون أقدم كثيرًا مما نعتقد اليوم، فكيف يمكن أن نفسِّر الملاحظات التي أدت إلى نظرية الانفجار الكبير؟ تتمثَّل الملاحظتان الأساسيتان في الانزياح نحو الأحمر وإشعاع الخلفية الكونية الميكروي، إضافةً إلى الكثير من التفاصيل الدقيقة. ربما لا يكون إشعاع الخلفية الكونية الميكروي من بقايا نشأة الكون، وما هو إلا ضوء النجوم يتقافز حول الكون على مدار الدهور، يُمتَص ثم يُشَع من جديد. تركز النسبية العامة على الجاذبية، بينما تنطوي هذه العملية على مجالات الإشعاع الكهرومغناطيسي أيضًا. ولأنَّ معظم المادة الموجودة في الكون من البلازما، التي تسير ديناميكياتها وفقًا للكهرومغناطيسية، فسيكون من الغريب أن نغفل هذه التأثيرات. بالرغم من ذلك، فقدَ علم كونيات البلازما التأييد عام ١٩٩٢، حين أوضحت بيانات «مستكشف الخلفية الكونية» أنَّ إشعاع الخلفية الكونية الميكروي يتسم بطيف الجسم الأسود.[10]

وماذا عن الانزياح نحو الأحمر؟ هو موجود بالتأكيد، ومنتشر في كل مكان، ويختلف وفقًا للمسافة. في عام ١٩٢٩، اقترح فريتس زفيكي أنَّ الضوء يفقد طاقة مع انتقاله؛

ومن ثمَّ فكلما زادت المسافة التي يقطعها، زاد الانزياح نحو الأحمر. ويُقال إنَّ نظرية «الضوء المرهق» هذه لا تتوافق مع آثار تمدد الزمن التي تلائم وجود أصل كوني (التمدد) يفسِّر الانزياح نحو الأحمر، لكن بعض النظريات المشابهة تستخدم آليات مختلفة تتفادى هذه المشكلة المحددة.

تقلل الجاذبية من طاقة الفوتونات، والتي تزيح أطيافها نحو الطرف الأحمر. وبالرغم من أنَّ الانزياح الأحمر الجذبوي الذي يحدث بسبب النجوم العادية صغير للغاية، فالثقوب السوداء، كتلك التي توجد في مراكز المجرات لها تأثير أكبر. والواقع أنَّ التقلبات الكبيرة النطاق في إشعاع الخلفية الكونية الميكروي (وفقًا لقياس مسبار ويلكينسون) تحدث بصفة أساسية بسبب الانزياح الأحمر الجذبوي. غير أنَّ هذا التأثير صغير للغاية أيضًا. بالرغم من ذلك كله، جادل هالتون أرب على مدار سنوات بأنَّ الانزياح نحو الأحمر يمكن أن ينتج عن تأثير الجاذبية القوية على الضوء، وهي نظرية قد استُبعِدت على نحوٍ تقليدي دون تفنيد مُرضٍ. ومع ذلك، فإنَّ هذه النظرية البديلة تتنبأ بدرجة الحرارة الصحيحة لإشعاع الخلفية الكونية. وهي تتفادى افتراض أنَّ الفضاء يتمدد بينما لا تتمدد المجرات، بالرغم من أنها في معظمها فضاء فارغ.[11]

تستمر النظريات البديلة للانفجار العظيم في التدفق. ومن أحدث هذه النظريات تلك التي اقترحها سوريا داس عام ٢٠١٤، وطوَّرها بالاشتراك مع أحمد علي،[12] وهي تستند على إعادة صياغة ديفيد بوم لميكانيكا الكم، والتي تلغي عنصر الصدفة. إنَّ نظرية الكم التي وضعها بوم غير تقليدية لكنها مقبولة إلى حد كبير، ومَن يرفضونها يفعلون ذلك لأنها مكافئة للنهج القياسي في معظم الجوانب وتختلف عنه بصفة أساسية في التأويلات، وليس لوجود برهان على خطئها. يخالف علي وداس الحجة المعتادة التي تؤيد الانفجار العظيم، والتي تعود بتمدد الكون إلى الوراء لإنتاج متفردة أولية. وهما يوضحان أنَّ النسبية العامة تتعطل قبل بلوغ المتفردة، غير أنَّ علماء الكونيات يستمرون في تطبيقها وكأنها لا تزال صالحة. بدلًا من ذلك، يستخدم علي وداس ميكانيكا بوم الكمومية، والتي يكون مسار الجسيم فيها منطقيًّا ويمكن حسابه. يؤدي هذا إلى وجود حد صغير للتصحيح في معادلات أينشتاين للمجال، وهو يلغي المتفردة. الحق أنَّ الكون ربما كان موجودًا على الدوام دونما تعارض مع الملاحظات الحالية.

على النظريات المنافسة للانفجار العظيم أن تمر ببعض الاختبارات الصارمة. فلو أن الكون كان موجودًا إلى الأبد، لاختفى معظم الديوتيريوم عبر الاندماج النووي، لكن ذلك لم

يحدث. من ناحية أخرى، لو كان عمر الكون نهائيًّا دون حدوث الانفجار الكبير، لما كان هناك ما يكفي من الهيليوم. تقوم هذه الاعتراضات على افتراضات محددة بشأن الماضي البعيد، غير أنها تغفل احتمالية حدوث شيء مختلف عن الانفجار العظيم، لكنه جذري بالدرجة نفسها. لم تظهر حتى الآن نظرية قوية تطرح تفسيرًا محددًا بديلًا، لكنَّ نظرية الانفجار الكبير لا تبدو راسخة أيضًا. وأنا أعتقد أنه بعد ٥٠ عامًا من الآن، سيطرح علماء الكونيات نظريات مختلفة تمامًا عن أصل الكون.

إنَّ الرأي العام السائد في علم الكونيات، والذي يفسر نشأة الكون على نحو نهائي بالانفجار العظيم، لا يعكس انقسامات عميقة بين الخبراء، ويتجاهل البدائل المربكة المثيرة للاهتمام، والتي تخضع الآن للتأمل والجدال بشأنها. ثمَّة توجُّه أيضًا للمبالغة في دلائل أحدث فكرة أو اكتشاف، سواء أكان تقليديًّا أم لا، قبل أن يتمكن أحد من التفكير فيه نقديًّا. لم أعد أذكر عدد المرات التي أعلنت فيها مجموعة من علماء الكونيات وجود دليل محدد على التضخم، ثم تُنفَى بعد بضعة أسابيع أو شهور بسبب تأويل مختلف للبيانات أو اكتشاف خطأ ما. يمكن قول الأمر نفسه وبتأكيد أكبر عن الطاقة المظلمة. تبدو فكرة الطاقة المظلمة أكثر متانة، لكنها هي أيضًا خاضعة للجدال.

ومن الأمثلة الحديثة على التراجع عن تأكيدٍ ما بسرعة كبيرة، الإعلان في مارس عام ٢٠١٤ أنَّ تجربة «بيسيب ٢» BICEP2، رصدت أنماطًا في الضوء المنبعث من مصادر بعيدة، من بقايا الانفجار العظيم، قد أثبتت بما لا يدع مجالًا للشك أنَّ نظرية التضخم الكوني صحيحة. وإضافة إلى ذلك، فقد أثبتت وجود الأمواج الثقالية التي تنبأت بها النسبية لكنها لم تُرصد قبل ذلك قط. يرمز BICEP إلى «تصوير الخلفية الكونية للاستقطاب العابر للمجرات» و«بيسيب ٢» هو تلسكوب خاص يقيس خلفية الأمواج الميكروية الكونية. قوبِل الإعلان وقت صدوره بقدر كبير من الإثارة؛ فأيٌّ من ذلكما الاكتشافين كان سيفوز بجائزة نوبل بالتأكيد. غير أنَّ مجموعات أخرى سرعان ما بدأت في التساؤل عمَّا إذا كان السبب الحقيقي في هذه الأنماط هو الغبار بين النجمي، أم لا. لم يكن ذلك محض انتقاد؛ إذ كانوا يفكرون في تلك المسألة لبعض الوقت.

وبحلول يناير من العام ٢٠١٥، صار من الواضح أنَّ نصف الإشارة التي اكتشفها التلسكوب «بيسيب ٢» على الأقل، كان بسبب الغبار فحسب، وليس التضخم. والآن، تراجع الفريق عن مزاعمه تمامًا؛ لأنه بعد استبعاد الجزء الناتج عن الغبار، لا يعود الجزء الباقي من الإشارة ذا دلالة إحصائية. علاوةً على ذلك، أوضح توروك، الذي كان من أوائل

الناقدين لنتائج «بيسيب ٢»، أنَّ النتائج المصحَّحة أبعد ما تكون عن إثبات التضخم؛ إذ إنها «تدحض» العديد من النماذج التضخمية البسيطة.

إنَّ هذه القصة محرجة لفريق تجربة «بيسيب ٢» الذي انتُقِد لإعلان مزاعم سابقة لأوانها. فقد علَّق جان كونراد في دورية «نيتشر»[13] بأنه لا بد للمجتمع العلمي «من الحرص على ألَّا تطغى التقارير الجذابة عن الاكتشافات الخاطئة على الأعمال الأكثر اتزانًا التي تضم اكتشافات علمية حقيقية.» من ناحية أخرى، فإنَّ هذه الأحداث توضح مسيرة العلم الحقيقية بجميع علاتها. إذا لم يُسمح لأحد بارتكاب الأخطاء، فلن نحرز أي تقدُّم على الإطلاق. وهي توضح أيضًا استعداد العلماء «لتغيير آرائهم» عند ظهور دليل جديد، أو اكتشاف خطأ دليل قديم. لا تزال بيانات تجربة «بيسيب٢» إنجازًا علميًّا جيدًا، والخطأ هو تأويلها فحسب. من المحال في عالم اليوم الذي يتسم بالتواصل الفوري أن ينتظر المرء قبل إعلان ما يبدو اكتشافًا كبيرًا حتى يتحقق من صحته تمامًا.

بالرغم من ذلك، عادة ما يعلن علماء الكونيات مزاعم مبهرة تقوم على قدر ضئيل من الأدلة الحقيقية، ويعبِّرون عن ثقتهم الكبيرة في أفكار لا تقوم إلا على أضعف الأساسات. إنَّ الغطرسة تولِّد الانتقام، الذي يحلِّق كثيرًا هذه الأيام. فربما تتخذ روح الانتقام الإلهية موضع الصدارة من جديد.

الفصل الثامن عشر

الجانب المظلم

«لم يكن هناك من شيء في الظلام لم يكن موجودًا حين كانت المصابيح مضاءة.»

رود سيرلينج، «منطقة الغسق»، الحلقة ٨١:
«لا شيء في الظلام»

انتهى الفصل الثاني عشر بكلمة «عفوًا». وقد كانت تعليقًا على اكتشاف أنَّ سرعات الدوران المحوري للمجرات غير منطقية. فبالقرب من المركز، تدور المجرة ببطء نسبيًّا، لكنَّ سرعة دورانها تبدأ في الزيادة مع الابتعاد عن المركز، ثم تبدأ في الاستقرار. غير أنَّ كلًّا من جاذبية نيوتن وأينشتاين، تقضيان بانخفاض معدل الدوران في الأجزاء الخارجية من المجرة.

يحل علماء الكونيات هذه المعضلة بافتراض أنَّ معظم المجرات تقع في منتصف هالة كروية شاسعة من المادة غير المرئية. كانوا يرجون في وقت من الأوقات أن تكون هذه المادة عادية فحسب لكنها لا تبعث من الضوء ما يكفي لأن نراها من مسافات بين المجرات، وأطلقوا عليها اسم المادة المظلمة الباردة. ربما كانت مقدارًا كبيرًا من الغاز أو الغبار فحسب، وهو يضيء على نحوٍ خافت للغاية لا يسمح لنا برؤيته. بالرغم من ذلك، فمع ظهور المزيد من الأدلة، لم يَعد هذا الطريق السهل للخروج من المعضلة متاحًا. فالمادة المظلمة، كما نفهمها اليوم، لا تشبه أي شيء آخر نعرفه، حتى في مسرِّعات الجسيمات العالية الطاقة. إنها قوة غامضة لا بد أنه يوجد الكثير للغاية منها.

لعلك تتذكر أنَّ النسبية تقول بأنَّ الكتلة تكافئ الطاقة. ويشير النموذج القياسي لعلم الكونيات، إضافةً إلى البيانات المأخوذة من «مسبار بلانك» التابع لوكالة الفضاء الأوروبية، إلى أنَّ إجمالي الكتلة/الطاقة في الكون المعروف يتألف من ٤٫٩٪ فحسب من

المادة العادية ومن ٢٦٫٨٪ من المادة المظلمة. وذلك يترك نسبة أكبر تبلغ ٦٨٫٣٪ تُعزى إلى الطاقة المظلمة. يبدو أنَّه يوجد من المادة المظلمة خمسة أضعاف ما يوجد من المادة العادية، وفي مناطق الكون على مستوى المجرات، تبلغ كتلة المادة المظلمة زائد الكتلة الفعالة للطاقة المظلمة «٢٠ ضعفًا» من كتلة المادة العادية.

إنَّ الحجة التي تؤيد وجود المادة المظلمة بكميات ضخمة بسيطة ومباشرة. فنحن نستدل على وجودها من خلال مقارنة تنبؤات معادلة كيبلر بالملاحظات. لقد احتلت هذه الصيغة دائرة الضوء في الفصل الثاني عشر. وهي تنص على أنَّ إجمالي كتلة المجرة، حتى نصف قطر محدد، يساوي نصف ذلك القطر مضروبًا في مربع سرعة الدوران المتجهة للنجوم التي تقع على تلك المسافة، ومقسومًا على ثابت الجاذبية. توضح الصور الواردة في الفصل الثاني عشر لمنحنى الدوران مثلما تتنبأ به قوانين نيوتن ومنحنيات الدوران المرصودة لست مجرات أنَّ الملاحظات تتعارض بدرجة كبيرة مع هذا التنبؤ. فبالقرب من قلب المجرة، تكون سرعة الدوران المرصودة صغيرة للغاية، وتصبح كبيرة للغاية في المناطق الخارجية. الواقع أنَّ منحنيات الدوران تظل ثابتة تقريبًا حتى مسافات أكبر كثيرًا من تلك التي تبقى المادة المرصودة ثابتة في نطاقها، وهو ما يمكننا رؤيته بصفة أساسية من خلال الضوء الذي تبعثه.

إذا استخدمت السرعات المرصودة لحساب الكتل، فستجد أنَّ قدرًا ضخمًا من المادة يوجد ولا بد فيما وراء نصف القطر المرئي. ولإنقاذ معادلة كيبلر التي بدا استنتاجها مؤكدًا، اضطُر علماء الفلك إلى افتراض وجود كميات كبيرة من المادة المظلمة غير المرصودة. وقد التزموا بهذه القصة منذ ذلك الحين.

كان هذا السلوك الشاذ لمنحنيات الدوران المجرية هو الدليل الأول على وجود كميات كبيرة من المادة غير المرئية في الكون بلا شك، وهو لا يزال الأكثر إقناعًا. بعض الملاحظات الإضافية وأوجه الشذوذ في الجاذبية تزيد أيضًا من ثِقل الفكرة، وتشير إلى أنَّ المادة المظلمة ليست مادة عادية لا تصدر الضوء فحسب. وإنما هي نوع مختلف تمامًا من المادة يتفاعل مع كل شيء آخر عبر قوة الجاذبية. ومن ثمَّ؛ فلا بد أنها تتكوَّن من جسيمات دون ذرية تختلف كليًّا عن أي شيء رصدناه من قبل في مسرِّعات الجسيمات.

إنَّ المادة المظلمة هي نوع من المادة لا تعرفه الفيزياء.

من المنطقي أن يكون جزء كبير من المادة الموجودة في الكون غير قابل للرصد، لكنَّ قصة المادة المظلمة في الكون تفتقر حاليًّا إلى خاتمة. ستكون الحجة الفاصلة هي تشكيل

جسيمات جديدة تتمتع بالخواص المطلوبة في إحدى مسرعات الجسيمات، مثل «مصادم الهدرونات الكبير». لقد توصَّل هذا الجهاز المدهش حديثًا إلى الملاحظة المذهلة المتمثلة في رصد بوزون هيجز، وهو جسيم يشرح السبب في أنَّ العديد من الجسيمات (وليس كلها) لديها كتلة. بالرغم من ذلك، فلم تُكتَشف أي من جسيمات الطاقة المظلمة في تجارب المسارع حتى الآن. ولم يوجد أي شيء أيضًا في الأشعة الكونية؛ أي الجسميات العالية الطاقة التي توجد في الفضاء الخارجي، وتصطدم بالأرض بكميات كبيرة.

إذن، فالكون مليء بهذه المادة، وهي أكثر انتشارًا من المادة العادية، لكننا لا نرى سوى المادة العادية في كل مكان ننظر فيه.

يشير علماء الفيزياء إلى سوابق. فالجسيمات الافتراضية الغريبة تتمتع بسجل جيد. يُعَد النيوترينو حالة كلاسيكية على ذلك؛ إذ استدل العلماء على وجوده بتطبيق قانون حفظ الطاقة على تفاعلات محددة للجسيمات. كان غريبًا بالضرورة مقارنة بالجسيمات المعروفة آنذاك؛ فليس له شحنة كهربية، ولا كتلة تقريبًا، ويستطيع اختراق جسم الأرض بالكامل دون أن يعوقه شيء. بدا الأمر غير منطقي، لكنَّ التجارب قد كشفت عن وجود النيوترينو. ويقوم بعض العلماء الآن بالخطوات الأولى في علم فلك النيوترينو، مستخدمين هذه الجسيمات في فحص العوالم البعيدة من الكون.

ومن ناحية أخرى، اتضح أنَّ الكثير من الجسيمات الافتراضية مختلقة من خيالات المنظِّرين المفرطة.

ظل العلماء يعتقدون لبعض الوقت أننا قد نكون عاجزين عن اكتشاف الكثير من «المادة الباردة المظلمة» العادية تمامًا، والتي تتمثَّل في الأجرام المضغوطة الثقيلة الهالية، وتُعرف أيضًا بالاختصار MACHOs. يشمل هذا المصطلح أيَّ نوع من الأجسام يتكوَّن من المادة العادية ولا يطلق سوى أقل القليل من الضوء، ويمكن أن يوجد في هالة مجرية، مثل الأقزام البنية والأقزام البيضاء والحمراء الخافتة والنجوم النيوترونية والثقوب السوداء، وحتى الكواكب. حين اتضحت معضلة منحنيات الدوران في البداية، كان هذا النوع من المادة تفسيرًا محتملًا واضحًا. غير أنَّ الأجرام المضغوطة الثقيلة الهالية تبدو غير كافية لتفسير المقدار الهائل من المادة غير المرصودة التي يعتقد العلماء بضرورة وجودها.

لا بد من وجود نوع جديد تمامًا من الجسيمات. ولا بد أن يكون شيئًا قد فكَّر العلماء فيه، أو يستطيعون التفكير فيه، ولا بد بالطبع أن يكون شيئًا لا نعرف بوجوده حتى الآن. وبهذا فإنَّنا نرتمي باندفاع في عالم التخمين.

يتمثل أحد الاحتمالات في مجموعة من الجسيمات الافتراضية التي تُعرف باسم الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل (WIMPs). ويقترح العلماء أنَّ هذه الجسيمات قد انبثقت من البلازما الكثيفة الفائقة الحرارة والتي كانت موجودة في بداية الكون، وأنها تتفاعل مع المادة العادية عبر القوة النووية الضعيفة فحسب. سيفي مثل هذا الجسيم بالغرض إذا كانت طاقته ١٠٠ جيجا إلكترون فولت تقريبًا. وتتنبأ نظرية التناظر الفائق، وهي مرشح رائد للتوحيد بين النسبية وميكانيكا الكم، بجسيم جديد يتسم بتلك الخواص تحديدًا. يُعرَف هذا التوافق باسم معجزة الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل. حين بدأ مصادم الهدرونات الكبير ملاحظاته، كان المنظِّرون يأملون أن يرصد طائفة بأكملها من الأنماط الجديدة الفائقة التناظر في الجسيمات المعروفة.

لكنه لم يرصد شيئًا من ذلك على الإطلاق.

لقد استكشف مصادم الهدرونات الكبير مجموعةً من الطاقات التي تتضمن ١٠٠ جيجا إلكترون فولت، ولم يرَ شيئًا لا يفسره النموذج القياسي.

لم يستطِع العديد من التجارب الأخرى التي تهدف لاكتشاف الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل أن تجد أي شيء. لم يُعثَر لها على أي أثر أيضًا في الانبعاثات الواردة من المجرات القريبة، وهي تغيب على نحو ملحوظ أيضًا في التجارب المختبرية التي تهدف إلى اكتشاف بقايا تصادماتها مع الأنوية. يستمر الكاشف الإيطالي «داما/ليبرا» في رصدِ ما يبدو أنه إشارات الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل، والتي ينبغي أن تولِّد دفقة من الضوء حين تصطدم ببلورة من يوديد الصوديوم. تصدر هذه الإشارات بانتظام في شهر يونيو كل عام؛ مما يشير إلى أنَّ الأرض تمر بحزمة من الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل في مكان محدَّد من مدارها. المشكلة أنَّ التجارب الأخرى يجب أن تكشف هي أيضًا عن هذه الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل، وذلك لا يحدث. إنَّ «داما» يرصد شيئًا ما، لكنه لا يرصد الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل على الأرجح.

أيمكن أن تكون المادة المظلمة نوعًا من الجسيمات أثقل كثيرًا؛ جسيمًا ضخمًا ضعيفَ التفاعل «وحشيًّا»؟ ربما. فالتلسكوب الراديوي «بيسيب ٢» يقدِّم أدلة مقنعة على أنَّ الكون في مراحله الأولى كان يمتلك من الطاقة ما يكفي لتشكيل ذلك المتضخم المراوغ، والذي يمكن أن يكون قد تحلل إلى جسيمات ضخمة ضعيفة التفاعل «وحشية». لا بأس بذلك كله، لكنَّ هذه الوحوش عالية الطاقة للغاية حتى إننا لا نستطيع صنعها، وهي تمر بالمادة العادية وكأنها غير موجودة؛ لذا لا نستطيع رصدها. بالرغم من ذلك، فقد نستطيع

أن نرصد ما تنتجه حين تصطدم بمواد أخرى، وها هي ذي تجربة «مكعب الثلج» في القطب الشمالي تبحث عن ذلك. من بين جسيمات النيوترينو العالية الطاقة التي وجدتها في منتصف العام ٢٠١٥، والتي يبلغ عددها ١٣٧، ربما يكون ثلاثة منها قد تولدت عن الجسيمات الضخمة البطيئة التفاعل «الوحشية».

ومع ذلك، فقد تكون المادة المظلمة أكسيونات. اقتُرِحت هذه الجسيمات في عام ١٩٧٧ على يد روبرتو بيكي وهيلين كوين، بصفتها حلًّا لمعضلة «تناظر الشحنة والتكافؤ» أو CP. ذلك أنَّ تفاعلات بعض الجسيمات تخالف تناظرًا جوهريًّا في الطبيعة، حيث يجتمع تناظر الشحنة (C؛ أي تحويل جسيم إلى الجسيم المضاد منه) والتكافؤ (P، الانعكاس المرآتي للفضاء). يتضح أنَّ بعض تفاعلات الجسيمات التي تجري عبر القوة الضعيفة لا تحتفظ بهذا التناظر. بالرغم من ذلك، فالديناميكا اللونية الكمومية، التي تتضمن القوة القوية، تتسم بتناظر الشحنة والتكافؤ. والسؤال هو: لماذا؟ توصَّل بيكي وكوين إلى حل هذه المعضلة عن طريق طرح تناظر إضافي يخترقه جسيم جديد يُدعى بالأكسيون. ومرةً أخرى، راح علماء التجارب يبحثون عنه، لكنهم لم يجدوا شيئًا مقنعًا.

إذا لم يكن الحل أيًّا مما سبق، فماذا يكون؟

يُعد النيوترينو مثالًا رائعًا على الجسيمات الغريبة التي كان يبدو اكتشافها مستحيلًا. تنتج الشمس أعدادًا كبيرة منها، لكنَّ الكواشف المبكرة لم تكتشف سوى ثلث العدد المتوقع من النيوترينوات الشمسية. غير أنَّ النيوترينوات تنقسم إلى ثلاثة أنواع، ومن المؤكد الآن أنها تتحول من نوع إلى آخر في أثناء انتقالها. لم تتمكن الكواشف الأولى إلا من الكشف عن نوع واحد. وحين جرت ترقيتها لاكتشاف النوعين الآخرين، زاد العدد بمقدار ثلاثة أضعاف. والآن، من المحتمل أن يوجد نوع رابع يُدعى بالنيوترينو العقيم. إنَّ نيوترينوات النموذج القياسي تتخذ اتجاه اليسار، أما النيوترينوات العقيمة، فسوف تتخذ اتجاه اليمين؛ إن كانت موجودة. (المصطلح التقني لهذه الحالة هو عدم التناظر المرآتي، وهو يميِّز الجسيمات عن انعكاسها المرآتي.) إذا كانت النيوترينوات العقيمة موجودة بالفعل، فإنها ستجعل النيوترينوات مشابهةً لجميع الأجسام الأخرى، وتفسِّر أيضًا كتلة النيوترينو، وسيكون ذلك رائعًا للغاية. وربما تكون هي الإشعاع المظلم، الذي يتوسط بين التفاعلات التي تجري بين الجسيمات المظلمة إذا كانت موجودة. أُجري العديد من التجارب لاكتشافها. فلم تكتشف تجربة «ميني بون» التي أجراها مختبر «فيرمي لاب» في عام ٢٠٠٧ أيَّ شيء، ولم يكتشف القمر الاصطناعي «بلانك» أيَّ شيء أيضًا عام ٢٠١٣.

بالرغم من ذلك، ففي تجربة فرنسية على جسيمات النيوترينو المنبعثة من مفاعل نووي، اختفى ٣٪ من النيوترينوات المضادة دون سابق إنذار. ربما كانت من النيوترينوات العقيمة.

إنَّ فهرس اختصارات التجارب التي صُمِّمَت لاكتشاف المادة المظلمة أو تحديد موقعها يبدو كقائمة من «المنظمات غير الحكومية شبه المستقلة»[1] التي تعينها الحكومة: ArDM – CDMS – CRESST – DEAP – DMTPC – DRIFT – EDELWEISS – EU-) RECA – LUX – MIMAC – POCASSO – SIMPLE – SNOLAB – WARP – XENON – ZEPLIN). وبالرغم من أنَّ هذه التجارب قدمت بيانات قيمة، وأحرزت نجاحات عديدة، فهي لم تجد أيَّ مادة مظلمة على الإطلاق.

ومع ذلك، وجد «تلسكوب فيرمي الفضائي لأشعة جاما» علامةً محتملة على المادة المظلمة في قلب المجرة عام ٢٠١٠. كان هناك شيء يبعث مقدارًا كبيرًا من أشعة جاما. وقد اعتُبِرَت هذه الملاحظة دليلًا قويًّا على وجود المادة المظلمة، والتي يمكن لبعض صورها أن تتحلل إلى جسيمات تنتج أشعة جاما حين تتصادم. لقد رأى بعض الفيزيائيين بالفعل أنها «دليل قاطع» يؤكد وجود المادة المظلمة. بالرغم من ذلك، يبدو الآن أنها لم تكن سوى مادة عادية تتمثَّل في آلاف النجوم النابضة التي لم تُرصَد من قبل، ولم يكن من الصعب إدراك ذلك نظرًا لضخامة كمية الأجرام الموجودة في قلب المجرة المكتظ وصعوبات رصد تلك المنطقة. علاوةً على ذلك، إذا كان الفائض في أشعة جاما ناتجًا عن المادة المظلمة، فلا بد أن تصدر المجرات الأخرى كميات مشابهة من أشعة جاما أيضًا. وفقًا لكيفورك أبازيجان وراين كيلي، فإنها لا تفعل.[2] اتضح أنَّ الدليل القاطع ليس سوى خيبة أمل أخرى.

في عام ٢٠١٥، بحث جريجوري روتي وجاستين ريد وآخرون عن أدلة مختلفة لوجود المادة المظلمة في قرص المجرة.[3] فعلى مدار الدهور، ابتلعت مجرة الطريق اللبني العشرات من المجرات التابعة؛ ومن ثمَّ فلا بد أنها ابتلعت هالاتها من المادة المظلمة أيضًا. في حالة قرص كوكبي بدائي مثلًا، ينبغي أن تتركز هذه المادة المظلمة في قرص يتطابق تقريبًا مع المادة العادية في المجرة. يمكن الكشف عن ذلك نظريًّا لأنه يؤثر في كيمياء النجوم. ذلك أنَّ النجوم الدخيلة ينبغي أن تكون أسخن بعض الشيء من النجوم الأصلية. ومع ذلك، أجري المسح على ٤٦٧٥ من النجوم المحتملة في القرص، ولم يكشف عن أي شيء من ذلك القبيل، بالرغم من أنَّ بعض هذه النجوم كانت في المناطق الأبعد إلى الخارج.

ولهذا يبدو أنَّ المجرة لا تحتوي على قرص من المادة المظلمة. وبالرغم من أنَّ ذلك لا يمنع احتواءها على الهالة التقليدية الكروية، فإنه يضيف قليلًا إلى القلق بأنَّ المادة المظلمة لا توجد على الإطلاق.

في بعض الأحيان تواجه المادة المظلمة مشكلة بسبب وجود الكثير للغاية منها. لعلك تتذكر أنَّ العناقيد الكروية هي كرات صغيرة نسبيًّا من النجوم تدور بمجرتنا والكثير غيرها من المجرات. لا تتفاعل المادة المظلمة إلا من خلال الجاذبية؛ ومن ثمَّ فهي لا تصدر أي إشعاع كهرومغناطيسي. وبهذا فإنها لا تستطيع التخلص من الحرارة، وهو شرط أساسي للانكماش بفعل الجاذبية؛ لذا فهي لا تستطيع تكوين تكتلات بصغر العناقيد الكروية. ومن ثمَّ فإنَّ العناقيد الكروية لا يمكن أن تحتوي على الكثير من المادة المظلمة. بالرغم من ذلك، يجد سكاربا أنَّ النجوم في مجرة «أوميجا سنتوري» أكبر العناقيد الكروية، تتحرك بسرعة أكبر كثيرًا مما يمكن تفسيره بالمادة المرئية. ولأنَّ المادة المظلمة يجب ألا توجد في هذه الحالة، فربما يكون المسئول عن ذلك الانحراف هو شيء آخر: قانون مختلف للجاذبية مثلًا.

بالرغم من بذل الكثير للغاية من البراعة والوقت والطاقة والنقود في مسعًى عقيم في الوقت الحالي يتمثَّل في البحث عن جسيمات الطاقة المظلمة، فإنَّ معظم علماء الفلك، لا سيما علماء الكونيات، يعتبرون أنَّ وجود الطاقة المظلمة أكيد. والحق أنَّ الطاقة المظلمة ليست فعالة بقدر ما يُزعَم عادةً.[4] فالهالة الكروية من الطاقة المظلمة، وهي الافتراض القياسي، لا تقدم تفسيرًا مقنعًا للغاية لمنحنى دوران المجرات. بعض التوزيعات الأخرى للمادة المظلمة تقدم تفسيرًا أفضل، لكن سيتعين علينا حينها أن نفسِّر السبب في أنَّ المادة التي لا تتفاعل إلا من خلال الجاذبية، ينبغي أن توزَّع بهذا الشكل. غالبًا ما يتم التغافل عن هذه الصعوبة، ويُرى التشكك في وجود المادة المظلمة على أنه نوع من الهرطقة.

لا يمكن إنكار أنَّ الاستدلال على وجود مادة غير مرئية من خلال ملاحظة أوجه الانحراف في مدارات النجوم أو الكواكب هي طريقة لها تاريخ طويل ومميز. لقد أدت إلى التنبؤ الناجح بوجود نبتون. وحالفها الحظ مع بلوتو أيضًا إذ كانت الحسابات تستند إلى افتراضات اتضح خطؤها، لكنَّ جِرمًا قد اكتُشِف بالقرب من الموقع الذي تنبأت به الحسابات على أية حال. وقد أدت أيضًا إلى اكتشاف العديد من الأقمار الصغيرة للكواكب العملاقة. ثم إنها أكدت النسبية عند تطبيقها على انحراف في التقدم المداري للحضيض

الشمسي لدى عطارد. علاوةً على ذلك، فقد اكتُشِفَ العديد من الكواكب الخارجية استنتاجًا من الطريقة التي تؤدي بها إلى تأرجح نجمها.

من ناحية أخرى، ثمَّة حادثة واحدة على الأقل أتت فيها هذه الطريقة بنتيجة أقل تميزًا للغاية؛ فولكان. مثلما رأينا في الفصل الرابع، فإنَّ التنبؤ بهذا الكوكب غير الموجود، الذي كان يُفترَض دورانه على مسافة أقرب إلى الشمس من كوكب الزهرة، كان محاولة لتفسير التقدم المداري للحضيض الشمسي لعطارد، من خلال تفسير الانحراف إلى الاضطراب بفعل كوكب غير مرصود.

وفي سياق هذه الحوادث السابقة، يتمحور السؤال الأهم حول ما إذا كانت المادة المظلمة كحالة نبتون أم كحالة فولكان. يقول الاعتقاد الفلكي السائد بأنها كحالة نبتون. غير أنه إذا كان هذا صحيحًا، فإن حالة نبتون ينقصها سمة أساسية في الوقت الحالي: نبتون نفسه. وعلى عكس وجهة النظر التقليدية، لا بد أن نعرض الاقتناع المتزايد، لا سيما بين بعض الفيزيائيين والرياضيين بأنها حالة فولكان.

لما كانت المادة المظلمة خجولة للغاية متى ما بحث عنها أيُّ شخص فعليًّا، فربما علينا أن نفكر في احتمالية عدم وجودها. إنَّ تأثيرات الجاذبية التي أدت بعلماء الكونيات إلى افتراضها تبدو مؤكدة؛ لذا ربما يجدر بنا البحث عن تفسير آخر. ربما يجدر بنا مثلًا أن نحاكي أينشتاين ونبحث عن قانون جديد للجاذبية. لقد نجحت هذه الطريقة معه.

في عام ١٩٨٣، قدَّم مورديخاي ميلجروم «ديناميكا نيوتون المعدَّلة» (MOND). وفقًا لميكانيكا نيوتن، يتناسب تسارع الجسم طرديًّا على نحو دقيق مع القوة المبذولة. واقترح ميلجروم أنَّ هذه العلاقة قد لا تنجح حين يكون التسارع صغيرًا للغاية.[5] وفي سياق منحنيات الدوران، يمكن إعادة تأويل هذا الافتراض بصفته تغييرًا طفيفًا لقانون نيوتن للجاذبية. كانت نتائج هذا الاقتراح مجدية بدرجة من التفصيل، وأُلغيَت بعض الاعتراضات. كثيرًا ما كانت «ميكانيكا نيوتن المعدلة» تُنتَقد لأنها ليست نسبوية، لكنَّ جيكوب بيكينشتاين صاغ عام ٢٠٠٤ تعميمًا نسبويًّا منها (الجاذبية الممتدة – المتجهة – السُلَّمية) TeVeS.[6] فليس من الحكمة أن تنتقد اقتراحًا جديدًا لزعمك بأنه يفتقر إلى سمة معينة، دون أن تكلف نفسك عناء البحث عنها.

ليست منحنيات دوران المجرات هي الانحراف الجذبوي الوحيد الذي اكتشفه علماء الفلك. فبعض العناقيد المجرية على وجه التحديد تبدو مرتبطة معًا بدرجة أقوى ممَّا يمكن تفسيره بالحقل الجذبوي للمادة المرئية. يحدث المثال الأقوى على مثل تلك الانحرافات

(وفقًا لمؤيدي وجود المادة المظلمة)، في عنقود «الطلقة»؛ حيث يتصادم اثنان من عناقيد المجرات. إنَّ مركز كتلة العنقودين نازح عن ذلك الموقع المستنتج من مناطق المادة العادية الأكثر كثافة، ويُقال إنَّ هذا التفاوت لا يتفق مع أي اقتراح حالي لتعديل جاذبية نيوتن.[7] بالرغم من ذلك، فليست تلك بنهاية القصة؛ إذ اقترحت دراسة جديدة عام ٢٠١٠ أنَّ الملاحظات لا تتفق أيضًا مع المادة المظلمة وفقًا لصياغتها في النموذج القياسي لعلم الكونيات (ΛCDM). في هذه الأثناء، جادل ميلجروم بأنَّ «ديناميكا نيوتن المعدلة» يمكن أن تفسر ملاحظات عنقود «الطلقة».[8] لقد صار من المقبول منذ فترة طويلة أنَّ ديناميكا نيوتن المعدلة لا تشرح ديناميكا العناقيد المجرية على نحو كامل، لكنها تعالج نصف أوجه التباين التي تُفسَّر بدونها بالمادة المظلمة. أما النصف الآخر، فيعتقد ميلجروم أنها مادة عادية غير مرصودة فحسب.

إنَّ هذا الرأي أكثر ترجيحًا مما يعترف به المناصرون لوجود المادة المظلمة في معظم الأحيان. وفي عام ٢٠١١، استرعى انتباه إيزابيل جرونييه أنَّ الحسابات الكونية غير صحيحة. وليس لذلك شأن بالمادة المظلمة ولا الطاقة المظلمة، فنصف المادة «العادية» (المصطلح التقني: الباريونية) الموجودة في الكون مفقود. لقد وجدت مجموعتها الآن قدرًا كبيرًا منها، وذلك في صورة مناطق من الهيدروجين الشديدة البرودة حتى إنها لا تصدر أيَّ إشعاع يمكننا اكتشافه من الأرض.[9] أتى الدليل من أشعة جاما التي تطلقها جزيئات أول أكسيد الكربون، والتي ترتبط بسحابات الغبار الكوني الموجودة في الفراغات ما بين النجوم. عادةً ما يوجد الهيدروجين في وجود أول أكسيد الكربون، لكنه أبرد كثيرًا مما يمكن اكتشافه. تشير الحسابات إلى إغفال كميات كبيرة للغاية من الهيدروجين.

ليس ذلك فحسب؛ بل يوضح الاكتشاف أيضًا أنَّ وجهات نظرنا الحالية تقلل كثيرًا من تقدير كمية المادة العادية. والحق أنَّ هذا التقليل في التقدير لا يكفي لاستبدال المادة العادية بالمادة المظلمة؛ بل يكفي لأن يستلزم إعادة التفكير في جميع حسابات المادة المظلمة. ومن أمثلة ذلك حسابات «عنقود الطلقة».

في المجمل، يمكن لديناميكا نيوتن المعدَّلة أن تفسِّر معظمَ ما يتعلق بالجاذبية من ملاحظات شاذة، ومعظمها يقبل العديد من التأويلات المتعارضة على أية حال. بالرغم من ذلك، فهي لا تحظى بالتأييد الكبير بين علماء الكونيات الذين يجادلون بأنَّ صياغتها عشوائية. أنا شخصيًّا لا أرى فيها من العشوائية أكثر مما أراه في افتراض وجود كميات هائلة من نوع جديد ومختلف تمامًا من المادة، لكني أعتقد أنَّ كلَّ ما في الأمر هو أنَّ ذلك

يسمح لهم بالاحتفاظ بمعادلاتهم الثمينة. ذلك أنك إذا غيرت المعادلات، فسوف تحتاج إلى أدلة جديدة تؤيد اختيارك من المعادلات الجديدة، وحقيقة «ملاءمتها للملاحظات» لا تثبت على وجه التحديد الحاجة إلى «ذلك التعديل». لم تقنعني هذه الحجة أيضًا؛ لأنَّ الأمر نفسه ينطبق على الأنواع الجديدة من المادة. لا سيما وأنَّ أحدًا لم يكتشف هذه المادة قط إلا من خلال الاستدلال على وجودها من آثارها المفترَضة على المادة المرئية.

ثمَّة نزعة لافتراض وجود احتمالين فقط؛ إما ديناميكا نيوتن المعدلة وإما المادة المظلمة. غير أنَّ نظرية الجاذبية ليست نصًّا مقدسًا، ويمكن تعديلها بعدد ضخم من الطرق. إذا لم نستكشف ذلك الاحتمال، فربما نكون قد وضعنا رهاننا على الحصان الخاطئ. وليس من الإنصاف أن نقارن النتائج الأولية التي توصَّل إليها بضعة من رواد تلك النظريات بالجهود الضخمة التي بذلها علم الكونيات التقليدي والفيزياء في مسعى المادة المظلمة. أنا وكوهين نسمي هذه الحالة «معضلة رولز-رويس»؛ فما من تصميم جديد من السيارات سيُنفَّذ إذا أصررت على أنَّ النموذج الأولي لا بد أن يكون أفضل من سيارة «رولز» جديدة.

ثمَّة طرق أخرى لتفادي استدعاء الطاقة المظلمة. درس خوسيه ريبالدا تناظر انعكاس الزمن في النسبية العامة، وتأثيره على الطاقات السالبة.[10] عادةً ما يُعتَقد أنَّ هذه الأخيرة تُستبعَد لأنها سوف تؤدي إلى تحلل الفراغ الكمومي عبر تشكيل أزواج الجسيمات/الجسيمات المضادة. ويوضح ريبالدا أنَّ مثل هذه الحسابات تفترض أنَّ العملية لا تحدث إلا في الزمن القادم. إذا أخذنا عملية انعكاس الزمن في الحسبان، والتي تفني فيها الجسيمات بعضها بعضًا، يكون التأثير الصافي على الفراغ صفرًا. سواء أكانت الطاقة موجبة أم سالبة؛ فهي لا تكون كذلك على نحو مطلق؛ بل يتوقف ذلك على ما إذا كان الملاحظ ينتقل إلى المستقبل أم الماضي. يؤدي بنا هذا إلى تقديم مفهوم لنوعين من المادة؛ المشيرة إلى المستقبل، والمشيرة إلى الماضي. يستلزم التفاعل بين هذين النوعين متريتين مختلفتين عوضًا عن المترية المعتادة، ولأنهما يختلفان في الإشارة، يمكن اعتبار هذا النهج بمثابة تعديل للنسبية العامة.

وفقًا لهذا الاقتراح، فإنَّ كونًا ثابتًا متجانسًا في البداية، سيمر بتمدد متسارع؛ إذ تضخِّم الجاذبية من التقلبات الكمومية. وهذا يلغي الحاجة إلى المادة المظلمة. يكتب ريبالدا بشأن المادة المظلمة: «إحدى أكثر السمات إثارة للاهتمام في المادة المظلمة أنَّ توزيعها الظاهري يختلف عن توزيع المادة. فكيف يمكن هذا إذا كانت «المادة المظلمة» تتفاعل

عبر الجاذبية وتتبع الخطوط الجيوديسية نفسها التي يتبعها جميع المادة والطاقة؟» بدلًا من ذلك، يستخدم ريبالدا تشبيهًا بالكهرباء الاستاتيكية ليقترح أنَّ الهالة الكروية التي تتألف من المادة المظلمة ويُفترَض أنها تحيط بالمجرة، هي في واقع الأمر فراغ كروي في منطقة ينتشر فيها توزيع المادة المشيرة إلى الماضي.

ربما حتى يمكن التخلص من الإضافات الثلاث بأكملها، وربما حتى الانفجار العظيم نفسه. وتُعَد النظرية التي وضعها علي وداس، التي تلغي المتفردة الأولية في نظرية الانفجار العظيم، وتسمح أيضًا بوجود كون قديم على نحوٍ لا نهائي، إحدى الطرق لتحقيق ذلك. وثمَّة طريقة أخرى وفقًا لروبرت ماكاي وكولين رورك، وهي تتمثَّل في أن نستبدل بالنموذج المعتاد للكون والذي يتسم بالاستواء على النطاقات الكبيرة، نموذجًا آخر يتسم بالتكتل على النطاقات الصغيرة.[11] يتسق هذا النموذج مع الهندسة الحالية للكون، أكثر مما يتسق نموذج مشعب ريمان الزائف القياسي بالفعل، ودون الحاجة إلى الانفجار العظيم. ربما يكون توزيع المادة في الكون استاتيكيًّا، بينما تأتي البُنى المنفردة كالمجرات وتذهب في دورة تستمر ١٠^١٦ سنوات تقريبًا. ربما يكون الانزياح نحو الأحمر ظاهرة هندسية تحدث بفعل الجاذبية لا ظاهرة كونية تحدث بفعل تمدد الفضاء.

وحتى إذا كانت هذه النظرية خاطئة، فإنها توضح أنَّ تغيير بضعة افتراضات بشأن هندسة الزمكان، يمكِّننا من الاحتفاظ بالصورة القياسية من معادلات أينشتاين للمجال، مع التخلص من «التدخل الغيبي» المتمثل في التضخم والطاقة المظلمة والمادة المظلمة، واستنتاج سلوك يتفق على نحو منطقي مع الملاحظات. ومع مراعاة معضلة «رولز–رويس»، يجدر بنا التفكير في نماذج أكثر ابتكارًا بدلًا من الالتزام بمعارف فيزيائية جذرية من دون أدلة كافية تدعمها.

لقد ظللت محتفظًا بطريقة محتملة للإبقاء على القوانين المعتادة للطبيعة مع إلغاء المادة المظلمة من المعادلة تمامًا. ليس ذلك بسبب وجود بدائل مثيرة؛ بل لأنَّ الحسابات التي يبدو أنها تثبت وجود المادة المظلمة قد تكون خاطئة.

أقول إنَّ السبب في هذا قد يكون أنني لا أريد الإفراط في الترويج للفكرة. غير أنَّ الرياضيين يبدءون في التشكك في الافتراضات التي تندرج في معادلة كيبلر، وتوضح نتائجها، وإن كانت غير مكتملة، أنَّ ثمَّة ما يستلزم الإجابة عنه. في عام ٢٠١٥، حلل دونالد ساري[12] الحجج الرياضية التي يستخدمها علماء الكونيات لتبرير وجود المادة

المظلمة، ووجد دليلًا على أنَّ قوانين نيوتن ربما تكون قد طُبِّقت على نحوٍ خاطئ في نظرية بنية المجرات ومنحنيات الدوران.

إذا كان هذا صحيحًا، فالأرجح أنَّ المادة المظلمة «فولكان» آخر.

يتركز اهتمام ساري الوحيد على البنية الرياضية للنموذج الرياضي القياسي الذي يستخدمه علماء الفلك لاشتقاق معادلة كيبلر. وتشكك حساباته فيما إذا كان هذا النموذج ملائمًا أم لا. إنه اقتراح جذري لكنَّ ساري خبير في رياضيات معضلة الأجسام «ن» والجاذبية بصفة عامة؛ لذا فإنَّ تبريره المنطقي جدير بالذكر. سأعفيكم من ذكر الحسابات التفصيلية، ويمكنكم الاطلاع عليها إن أردتم في ورقته البحثية.

إنَّ كل شيء يقوم على أساس معادلة كيبلر. ينتج هذا على نحو مباشر وصحيح من افتراض واحد أساسي للنمذجة. فالنموذج الواقعي لإحدى المجرات ينبغي أن يتضمن مئات المليارات من النجوم. يمكن تجاهل كواكبها وغير ذلك من الأجسام الصغيرة على الأرجح، لكنَّ النموذج الدقيق يتمثَّل في معضلة الأجسام «ن»؛ حيث «ن» تساوي ١٠٠ مليار أو أكثر. ربما لا تتغير النتائج كثيرًا إذا قللنا ذلك الرقم، لكننا رأينا في الفصل التاسع أنه حتى حين كانت ن = ٣ ($٢\frac{١}{٢}$ بالفعل)، كانت معضلة الأجسام «ن» مستعصية.

ولهذا يصمِّم علماء الفلك افتراض النمذجة الذي يؤدي عند جمعه بمبرهنة رياضية أنيقة، إلى تبسيط المجرة إلى جسم واحد. بعد ذلك، يحللون حركة نجمٍ ما حول هذا الجسم لاستنتاج منحنى الدوران النظري من معادلة كيبلر. يتمثَّل الافتراض في أنه عند النظر إلى المجرات على النطاقات المجرية، فإنها تبدو أشبه بسائل متدفق — حساء من النجوم — أكثر مما تبدو نظامًا يتمثَّل في «ن» من الأجسام. في هذه الحالة من «الاتصال» تنطبق مبرهنة لطيفة أثبتها نيوتن. (كان قد استخدمها لتبرير التعامل مع الكواكب الكروية على أنها كتل نقطية.) معنى هذا أنَّه وفقًا لبعض افتراضات التناظر المنطقية، يبلغ إجمالي القوة المبذولة داخل وعلى أي غلاف كروي محدَّد صفرًا، بينما تكون القوة المبذولة خارجيًّا مساوية لما كانت لتصبح عليه إذا كانت جميع المادة بداخل الغلاف متكثفة في النقطة المركزية.

تخيَّل نجمًا في إحدى المجرات، ولنسمِّه نجم الاختبار، وتخيَّل غلافًا كرويًّا له مركز مطابق لمركز المجرة، وهو يمر عبره. الكتلة الموجودة بداخل الغلاف هي ما كنت أسميه من قبل «الكتلة بداخل نصف القطر ذاك». بصرف النظر عمَّا تفعله النجوم الموجودة بداخل ذلك الغلاف، يمكن تطبيق مبرهنة نيوتن لتركيز إجمالي كتلتها في مركز المجرة، من

دون التأثير على القوة الكلية التي يشهدها نجم الاختبار. لا تبذل النجوم الموجودة خارج الغلاف أيَّ قوة على الإطلاق؛ لأنَّ نجم الاختبار يقع على ذلك الغلاف. وبهذا، تُختصَر حركة نجم الاختبار حول المجرة إلى مشكلة «الجسمين»؛ نجم يدور حول نقطة ثقيلة للغاية من الكتلة. تنتج معادلة كيبلر من هذا مباشرةً.

يتمثل افتراض التناظر اللازم لتطبيق مبرهنة نيوتن في أنَّ جميع النجوم تتبع مدارات دائرية، وأنَّ النجوم التي تقع على المسافة نفسها من المركز تتحرك بالسرعة نفسها. معنى هذا أنَّ الديناميكيات تتسم بالتناظر الدوراني. بعد ذلك يسهل اشتقاق الحلول الدقيقة لمعادلات الحركة في حالة حساء النجوم. يمكنك اختيار صيغة توزيع الكتلة أو صيغة منحنى الدوران، ثم استخدام معادلة كيبلر لاستنتاج الحل الآخر. ثمَّة شرط واحد بالرغم من ذلك، وهو أنَّ الكتلة لا بد أن تزيد بزيادة نصف القطر.

وبهذا، يكون نموذج حساء النجوم ذاتي الاتساق؛ إذ يتفق تمامًا مع جاذبية نيوتن ويتبع معادلة كيبلر. ويبدو أنَّ الافتراض الضمني بالتناظر الدائري يتفق هو أيضًا مع الملاحظات. وهكذا نحصل على نموذج عريق يستند إلى رياضيات بارعة وصالحة، ويتيح حل المسألة. لا عجب إذن أنَّ علماء الفلك يحبونه.

بالرغم من ذلك، فهو معيب من الجانب الرياضي مع الأسف. ونحن لا نعرف مدى خطورة هذا العيب حتى الآن، لكنه مؤذٍ وقد يكون مهلكًا.

يتشكك العلماء في سمتين من سمات هذا النموذج. السمة الأولى هي افتراض المدارات الدائرية لجميع النجوم. غير أنَّ السمة الأهم هي مقاربة الاتصال؛ حساء النجوم. تتمثَّل المشكلة في أنَّ تسوية جميع النجوم بداخل الغلاف يلغي جزءًا مهمًّا من الديناميكيات. يُقصد بهذا «التفاعلات» بين النجوم القريبة من الغلاف، والنجم الذي نحاول حساب سرعة دورانه.

في النموذج المتصل، لا يهم ما إذا كانت المادة الموجودة بداخل الغلاف تدور أم ساكنة. كلُّ ما يهم هو إجمالي الكتلة بداخل الغلاف. علاوةً على ذلك، فإنَّ القوة التي تبذلها هذه الكتلة على نجم الاختبار تتجه دائمًا نحو مركز المجرة. تعتمد معادلة كيبلر على هذه الحقائق.

غير أنَّ النجوم في نظام الأجسام «ن» الحقيقي أجسامٌ منفصلة. إذا مرَّ نجم ثانٍ قريبًا للغاية من نجم الاختبار، فإنَّ الانفصال يتضمن هيمنة النجم الآخر على مجال الجاذبية المحلي، ويجذب نجم الاختبار نحوه. إذن، فهذا النجم القريب «يسحب» نجم

الاختبار معه. يؤدي هذا إلى «زيادة سرعة» دوران نجم الاختبار حول مركز المجرة. لا شك بأنه يبطئ النجم العابر أيضًا، لكنَّ ذلك سرعان ما يزول ليحل محله نجم آخر، يتبعه بالخلف. تشير هذه الحجة البديهية إلى أنَّ معادلة كيبلر تقلل من تقدير سرعات الدوران على مسافات بعيدة. وإذا كان هذا صحيحًا، فإنه يساعد في تفسير وجه الشذوذ.

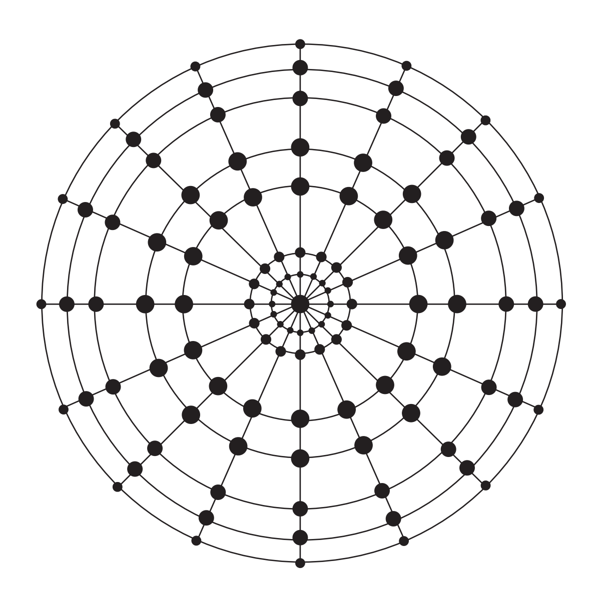
لنذكر تشبيهًا مبسطًا للغاية. تخيَّل محملًا كرويًّا ضئيلًا مستقرًّا فوق عجلة دوارة (وكلاهما محدَّد بمستوًى دون جاذبية تتسبب في اضطراب المحمل الكروي). إذا كانت العجلة دائرة مستوية تمامًا، فلن يكون لها أي تأثير على المحمل الكروي، وكأنها ثابتة. غير أنَّ نظام الأجسام «ن» المنفصل يستبدل بالعجلة ترسًا مسننًا. والآن يصطدم كل سن من أسنان الترس بالمحمل الكروي؛ فيدفعه في اتجاه الدوران. إنَّ الأسنان الشديدة الصغر لم تمنع الركلة؛ إذ يوجد المزيد منها. ولهذا، فالركلة المقيِّدة للأسنان الصغيرة ليست كالركلة في حالة عدم وجود أسنان على الإطلاق؛ أي صفر.

ليست هذه الحجة محض عمل غير واضح المعالم وغير مدعوم بالأدلة. وإنما يقدِّم ساري الحسابات اللازمة لإثبات أنَّ حساء النجوم المستوي، «لا» يمثل على النحو الملائم توزيع نظام الأجسام «ن»، حيث يكون «ن» كبيرًا. فهو على وجه التحديد يتجاهل الشد. بالرغم من ذلك، فقد يكون التأثير الإجمالي للشد صغيرًا لأنَّ ديناميكيات نموذج الأجسام «ن» الحقيقي أكثر تعقيدًا من السيناريو الذي حللناه للتو. ولتقييم أهمية تأثير الشد، علينا استخدام نموذج دقيق للجسم «ن» لجميع النجوم الموجودة داخل الغلاف، من أجل إيجاد تأثيرها الجمعي على نجم الاختبار.

تتمثَّل الطريقة الأفضل لتحقيق ذلك في بناء حالة للجسم «ن» تحتفظ بجميع الخواص الأساسية المفترضة لحساء النجوم، بخلاف الاتصال. إذا غيَّرت هذه الحالة المحددة معادلة كيبلر، فيمكننا التأكد حينها أنَّ السبب في ذلك هو استبدال حساء النجوم المتصل بالأجسام المنفصلة «ن». تلك الخواص الأساسية هي توزيع الكتلة المتناظر، مع تحرك كل نجم من النجوم في دائرة بينما يتجه تسارعه نحو مركز المجرة.

بالرغم من أننا لا نستطيع في العموم كتابة حلول مباشرة لمسائل الأجسام «ن»، فثمَّة فئة من الحلول يمكن تحقيق ذلك من خلالها، وهي تُعرف باسم التكوينات المركزية. في هذه الحالات الخاصة، تدور جميع الحلقات المتحدة المركز من النجوم، والتي تشبه شبكة عنكبوت، بالسرعة المتجهة الزاوية نفسها، وكأن التكوين صلب. تعود هذه الفكرة إلى

ورقة نُشِرت عام ١٨٥٩ ألَّفها جيمس كليرك ماكسويل عن ثبات حلقات زحل، وقد ذُكِرت في الفصل السادس بصفتها دليلًا على أنَّ الحلقات لا يمكن أن تكون صلبة. يستخدم ساري فكرة مشابهة لاقتراح أنَّ نموذج حساء النجوم لا يمكن أن يمثل ديناميكيات المجرة على نحو صحيح.



تكوين مركزي. يمكن وجود أي عدد من الحلقات والأسلاك. تتساوى الكتل الموجودة على كل حلقة من الحلقات، لكنَّ الحلقات المختلفة تختلف في الكتل. يمكن تعديل أنصاف أقطار الحلقات. في حالة وجود سرعة دوران محددة، يمكن اختيار الكتل لتناسب نصف قطر محدد، أو العكس. يمكن أيضًا وجود تنويعات أخرى من فكرة شبكة العنكبوت.

إنَّ التكوينات المركزية اصطناعية؛ أي أنَّ أحدًا لن يتوقَّع وجود مثل ذلك الشكل المنتظم في أي مجرة حقيقية. من ناحية أخرى، فهي اختيار منطقي لاختبار مدى توافق نموذج الاتصال ونموذج الأجسام «ن» معًا. إذا اخترنا ما يكفي من الخطوط نصف القطرية في الشبكة وما يكفي من الدوائر، فسنحصل على حساء كثيف للغاية من النجوم، مما يمثل خاصية الاتصال على نحو جيد. علاوةً على ذلك، فإنَّ تكوين شبكة العنكبوت يفي إلى حد كبير أيضًا بشروط التناظر المستخدمة لاستنتاج معادلة كيبلر. وبهذا، فمن المحتمل أن تنجح المقاربة بحساء النجوم.

إنَّ معادلة كيبلر ينبغي أن تكون صالحة على وجه التحديد لشبكة عنكبوت دوارة. ويمكن التحقق من هذا باستخدام النسخة التي تعبِّر عن توزيع الكتلة استنادًا إلى السرعة المتجهة عند نصف قطر محدد. ولأنَّ شبكة العنكبوت تدور على نحو صارم، تتناسب السرعة المتجهة تناسبًا طرديًّا مع نصف القطر. ومن ثمَّ تتنبأ معادلة كيبلر بأنَّ توزيع الكتلة يتناسب طرديًّا مع مكعب نصف القطر. ستكون هذه النتيجة صالحة بصرف النظر عن الكتلة الفعلية للنجوم الموجودة في التكوين.

للتحقق من هذا، نجري الآن حساب نموذج الأجسام «ن» المنفصل «الدقيق» لشبكة العنكبوت. إنَّ نظرية التكوينات المركزية تسمح بقدر كبير من المرونة في اختيارات كتل النجوم. فعلى سبيل المثال، إذا كان كل نجم من النجوم يتسم بالكتلة نفسها (ومن ثمَّ كل حلقة)، فإنَّ التكوينات المركزية موجودة، وتوزيع الكتلة أقل دائمًا من ثابت مضروب في نصف القطر. بالرغم من ذلك، تخبرنا معادلة كيبلر في هذه الحالة أنَّ كتلة الحلقة الأبعد إلى الخارج تبلغ «مليون ضعف» الحلقة الأبعد إلى الداخل، مع أنَّهما متساويتان في الكتلة في الواقع. إذن، فالحساب الدقيق «لا» يثبت صحة النموذج الدقيق الذي يفضي إلى معادلة كيبلر. وعلى العكس من ذلك، فمع زيادة نصف القطر، تزداد الكتلة الصحيحة بدرجة أبطأ كثيرًا مما تتنبأ به معادلة كيبلر.

إنَّ هذه العملية الحسابية تثبت أنَّ نموذج حساء النجوم قد ينتج نتائج خاطئة للغاية، حتى وإن كانت الافتراضات التي يستند النموذج إليها مبررة. وبالرغم من العبارة الشهيرة التي تسيء استخدام المصطلح العتيق «يثبت»، فإنَّ استثناءً واحدًا «يلغي إثبات» القاعدة.[13]

تفضي حسابات ساري إلى نتيجة مهمة أخرى. إذا كانت المادة المظلمة موجودة بالفعل، وتشكل هالات شاسعة ضخمة حول المجرات مثلما يعتقد علماء الفلك، فإنها لا يمكن أن تفسِّر في حقيقة الأمر منحنى الدوران الشاذ الذي بدأ الأمر برُمَّته في الأصل. فإما أن يكون قانون الجاذبية خاطئًا، وإما أن تكون افتراضات النمذجة التقليدية خاطئة.

الفصل التاسع عشر

خارج الكون

«في بعض الأحيان، كان صانع النجوم يطرح مخلوقات هي في حقيقة الأمر مجموعات من عدة أكوان مترابطة تمثل أنظمة فيزيائية من أنواعٍ مختلفة للغاية.»

أولاف ستابليدون، «ستار ميكر» (صانع النجوم)

لماذا نحن هنا؟

ذلك هو السؤال الفلسفي الجوهري. فالبشر ينظرون عبر نوافذ عيونهم إلى عالم أكثر منهم ضخامة وقوة. وحتى إذا كان العالم الذي تعرفه قرية صغيرة في منطقة مُزالة من الغابة، فستجد ما تتأمل فيه من عواصف رعدية وأسود وحيوانات فرس النهر، وكلها توحي بالرهبة بالفعل. وحين يكون عالمك باتساع ٩١ مليار سنة ضوئية و«مستمر في الزيادة»، فإنَّ ذلك يبعث على التواضع دون شك. يوجد الكثير للغاية من «الكون» والقليل للغاية منا «نحن». وهو ما يجعل التساؤل بـ «لماذا» كبيرًا للغاية.

بالرغم من ذلك، فشعور البشرية بأهميتها الذاتية لا يظل أبدًا متواضعًا لفترة طويلة. من حسن الحظ أنَّ الأمر نفسه ينطبق على شعورها بالتعجب وفضولها النهم. ولهذا، نجرؤ على طرح السؤال الجوهري.

إنَّ الاعتراضات التي ناقشتُها في الفصلين السابقين لم تُضعِف من اقتناع علماء الكونيات بأنهم يعرفون الإجابة، وهي أنَّ الانفجار العظيم وملحقاته، تصف الكيفية التي نشأ بها الكون على النحو الصحيح. وبالمثل، نجد أنَّ علماء الفيزياء مقتنعون بأنَّ نظرية النسبية والنظرية الكمومية تفسران معًا الكيفية التي يتصرف بها الكون. سيكون من

الجيد توحيد هاتين النظريتين، لكنهما تعملان منفردتين على نحوٍ جيد عمومًا إذا اخترت النظرية الصحيحة.

يخبرنا علم الأحياء بقصة أكثر إقناعًا عن نشأة الحياة وتطورها إلى ملايين الأنواع التي تسكن الأرض اليوم، ونحن من بينها. يزعم بعض المؤمنين ببعض الأنظمة العقائدية أنَّ التطور يستلزم تحقُّق مصادفات غير محتملة على الإطلاق، غير أنَّ علماء الأحياء شرحوا مرارًا وتكرارًا عيوب تلك الحجج. إنَّ فهمنا للحياة على الأرض يتسم بفجوات عديدة، لكنَّ إحداها أننا نملأ هذه الفجوات. فالقصة الأساسية متسقة، وتدعمها أدلة من أربعة مجالات مستقلة على الأقل: السجل الأحفوري، والحمض النووي، والتصنيف التفرعي الحيوي (أشجار العائلات للكائنات)، وتجارب الاستيلاد.

بالرغم من ذلك، حين يتعلق الأمر بعلم الكونيات، نجد أنه حتى الفيزيائيون وعلماء الكونيات منشغلون بأنَّ الكون مثلما نفهمه اليوم، يقتضي حدوث عدد ضخم للغاية من المصادفات. وليست المشكلة في تفسيرِ ما يفعله الكون؛ بل السبب في أنَّ ذلك التفسير المحدَّد منطقي دونًا عن مجموعة أخرى من التفسيرات التي تبدو محتملة بالدرجة نفسها على النحو الظاهري. تلك هي مشكلة الضبط الدقيق للكون، والحق أنَّ الخلقيين وعلماء الكونيات يأخذونها بجدية شديدة على حد سواء.

يظهر الضبط الدقيق لأنَّ الفيزياء تعتمد على عدد من الثوابت الأساسية، مثل سرعة الضوء، وثابت بلانك في النظرية الكمومية، وثابت البنية الدقيقة الذي يحدِّد شدة القوة الكهرومغناطيسية.[1] يتخذ كل ثابت قيمة عددية محددة قاسها العلماء. تبلغ قيمة ثابت البنية الدقيقة على سبيل المثال ٠٫٠٠٧٢٩٧٣٥. وما من نظرية فيزيائية مقبولة تتنبأ بقيم هذه الثوابت. فبحسب معرفتنا المحدودة، كان يمكن لقيمة ثابت البنية الدقيقة أن تساوي ٢٫٦٧٧٤٣ أو ٨٤٢٠٠٦٤٤٤٫٩٩٨ أو ٤٢.

أيشكل ذلك فرقًا؟ فرقًا كبيرًا بالتأكيد. فالقيم المختلفة للثوابت تؤدي إلى فيزياء مختلفة. لو أنَّ ثابت البنية الدقيقة كان أصغر قليلًا أو أكبر قليلًا، لصار تركيب الذرات مختلفًا، ولربما حتى أصبحت غير مستقرة. ومن ثمَّ لم يكن ليوجد بشر ولا كوكب يعيشون عليه، ولا ذرات تشكلهم.

وفقًا للعديد من علماء الكونيات والفيزيائيين، فإنَّ قيم الثوابت التي تجعل وجود البشر «ممكنًا» ينبغي أن تكون في نطاق بضعة أجزاء من العشرة من القيم الموجودة في هذا الكون. واحتمالات حدوث هذا تساوي رمي عملة معدنية على الوجه المنقوش لست

مرات متتالية. ونظرًا لأنَّ كوننا يتضمن ٢٦ ثابتًا على الأقل، فإنَّ احتمال وجود كوننا بالقيم التي يوجد عليها، والتي هي مناسبة لوجود الحياة، تساوي رمي عملة معدنية على الوجه المنقوش ١٥٦ مرة متتالية. أو ما يساوي ١٠$^{-٤٧}$، أو

٠,٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠١

إذن، لم يكن يُفترَض بنا أن نوجد أصلًا.

بالرغم من ذلك، فها نحن أولاء هنا. وذلك لغز.

يرى بعض المتدينين هذه العملية الحسابية بصفتها برهانًا على وجود إله يتمتع برفاهية اختيار قيم الثوابت الأساسية التي تجعل الحياة ممكنة. غير أنَّ إلهًا يتمتع بتلك القوة كان يستطيع أيضًا اختيار قيم مختلفة تمامًا، ثم يحقق معجزة، بحيث يوجد الكون على أي حال بالرغم من الثوابت الخاطئة. فما من سبب يدفع خالقًا كليَّ القدرة لاستخدام ثوابت أساسية على الإطلاق.

يبدو أنَّ لدينا خيارين. إما أن تكون قوةٌ ما خارقة للطبيعة هي التي رتَّبت هذه الثوابت، وإما أن تفسِّر لنا الفيزياء في المستقبل السبب في أنَّ الثوابت الأساسية القائمة حتمية.

وحديثًا، أضاف علماء الكونيات خيارًا ثالثًا، وهو أنَّ الكون يجرِّب جميع القيم الممكنة بالترتيب. وإذا كان هذا صحيحًا، فإنَّ الكون سيعثر على الأعداد المناسبة للحياة، وسوف تتطور الحياة. وإذا ظهرت حياة تتسم بالذكاء ونما فهمها بعلم الكونيات، فسوف تحار كثيرًا بشأن سبب وجودها في هذا الكون. وحين تفكر في هذا الخيار الثالث، ستكف عن القلق.

يُدعى هذا الخيار الثالث بالأكوان المتعددة. وهي نظرية جديدة ومبتكرة ويمكن إنتاج بعض المعارف الفيزيائية البارعة من خلالها. وسوف أخصِّص معظم الفصل لتقديم العديد من نسخها.

بعد ذلك، سأقدِّم الخيار الرابع.

لقد نسَّق علم الكونيات الحديث ما يعتقد أنه وصف دقيق جدًّا لما نعنيه عادةً بمصطلح «الكون»؛ ومن ثمَّ اختُرِع مصطلح جديد؛ «الأكوان المتعددة». يشير هذا المصطلح إلى الكون بمعناه المعتاد، إلى جانب أي عدد من الأكوان الإضافية الافتراضية. فثمَّة أكوان «موازية» أو أكوان «بديلة»، يمكن أن توجد مع عالمنا، أو توجد خارجه، أو تكون مستقلة عنه كليًّا. غالبًا ما تُستَبعد هذه التخمينات بصفتها غير علميةٍ ويصعب للغاية اختبارها

مقابل البيانات الفعلية. بالرغم من ذلك، فبعضها يقبل الاختبار نظريًّا على الأقل، وذلك بالطريقة العلمية القياسية المتمثلة في استنتاجِ ما لا يمكن رؤيته مباشرة أو قياسه من خلال ما يمكن رؤيته أو قياسه. لقد ظنَّ كونت أنه من المحال أبدًا أن نعرف التركيب الكيميائي للنجوم. غير أنَّ علم التحليل الطيفي قد عكس اعتقاده تمامًا؛ فكثيرًا ما يكون التركيب الكيميائي هو جلَّ ما نعرفه عنها تقريبًا.

في كتاب «الواقع الخفي»،[2] يصف عالم الفيزياء الرياضي براين جرين، تسعة أنواع مختلفة من الكون المتعدد. وسأناقش هنا أربعة منها:

- «الكون المتعدد المرقَّع»: هو كون لا نهائي يشبه نسيجًا محيكًا بفن الترقيع، ويوجد من كل منطقة فيه نسخة مطابقة تقريبًا في مكان آخر.
- «الكون المتعدد التضخمي»: متى ما فجَّر التضخم الأبدي القطة والتلفاز، يظهر كون جديد يتخذ ثوابت مختلفة.
- «الكون المتعدد المشهد»: شبكة من الأكوان البديلة التي تتصل معًا من خلال النفق الكمومي، ويتبع كلٌّ منها نسخته الخاصة من نظرية الأوتار.
- «الكون المتعدد الكمومي»: أكوان متوازية متراكبة لكلٍّ منها وجوده المنفصل. يُعد هذا الكون نسخة من قطة شرودينجر الشهيرة، فكلاهما حي وميت في الوقت ذاته.

يجادل جرين بأنه من المنطقي أن نفكِّر في هذه الأكوان البديلة، ويشرح أنها مدعومة إلى حدٍّ ما بالفيزياء الحديثة. إضافةً إلى ذلك، يمكن حل الكثير من المشكلات التي لا نفهمها من خلال التفكير بمنظور الكون المتعدد. وهو يشير إلى أنَّ الفيزياء الجوهرية قد أوضحت مرارًا وتكرارًا أنَّ الرؤية الساذجة للكون على النحو الذي تصوره حواسنا خاطئة، ويمكننا أن نتوقَّع استمرار ذلك الأمر. يضفي جرين بعض الأهمية على السمة المشتركة بين جميع نظريات الكون المتعدد، وهي أنها جميعًا «تشير إلى أنَّ الصورة المنطقية الشائعة لدينا عن الواقع ما هي إلا جزء من كلٍّ أكبر.»

لست مقتنعًا بأنَّ وجود الكثير من التخمينات التي تفتقر كلها إلى الاتساق يجعل أيًّا منها أقرب إلى الصحة. إنَّ هذا يشبه الطوائف الدينية: ما لم تكن مؤمنًا حقيقيًّا، عادةً ما تنزع الاختلافات الجوهرية في العقيدة والتي ترتبط بادعاءات مشتركة بالوحي الإلهي، إلى الطعن فيها جميعًا. بالرغم من ذلك، سنتناول بضع نسخ من نظرية الأكوان المتعددة، ويمكنك بعد ذلك أن تقرِّر بنفسك. وسوف أذكر شيئًا من أفكاري الخاصة بالطبع.

سأبدأ بالكون المتعدد المرقَّع. الحق أنه لا يمثل أكوانًا متعددة بالفعل؛ بل كونًا كبيرًا للغاية حتى إنَّ سكانه لا يتمكنون إلا من رصد رقع منه. غير أنَّ هذه الرقع تتشابك. ويتوقف هذا على أن يكون المكان لا نهائيًّا، أو شديد الاتساع على نحوٍ لا يمكن تخيُّله؛ أي أكبر كثيرًا من الكون القابل للرصد. عند الجمع بين هذه الفكرة وبين الطبيعة المميزة لميكانيكا الكم، نحصل على نتيجة مثيرة للاهتمام. بالرغم من أنَّ عدد الحالات الكمومية الممكنة للكون القابل للرصد ضخمة، فإنها لا نهائية. هذا يعني أنَّ الكون القابل للرصد لا يمكن أن يفعل سوى عدد كبير نهائي من الأمور المختلفة.

لتبسيط الصورة، تخيل كونًا لا نهائيًّا. قطِّعه في ذهنك إلى قطع مثل لحافٍ صُنِع بفن الترقيع، على أن تكون كل قطعة كبيرة بما يكفي لتضم الكون القابل للرصد. تتسم الرقع ذات الحجم المتساوي بالعدد نفسه من الحالات الكمومية الممكنة، والتي سوف أسميها بحالات الرقع. ولأنَّ كونًا لا نهائيًّا يضم عددًا لا نهائيَّ الرقع التي يتخذ كلٌّ منها العدد النهائي نفسه من الحالات، فإنَّ واحدةً على الأقل من حالات الرقع ستحدث كثيرًا على نحوٍ لا نهائي.[3] ومع مراعاة الطبيعة العشوائية لميكانيكا الكم، من المؤكد أنَّ «جميع» حالات الرقع ستحدث كثيرًا على نحوٍ لا نهائي.

يبلغ عدد الحالات المنفصلة لرقعة في حجم الكون القابل للرصد $١٠^{١٠^{١٢٢}}$ تقريبًا. وهو ما يساوي كتابة العدد ١ متبوعًا بـ ١٢٢ صفرًا، ثم البدء من جديد وكتابة العدد ١ متبوعًا بـ «ذلك» العدد الضخم من الأصفار. (لا تحاول تجربة ذلك في المنزل. فعدد جسيمات الكون أصغر كثيرًا من أن يوفِّر الورق والحبر الكافيين، وسرعان ما سينتهي الكون بعد أن تبدأ). وبمنطق مشابه، تقع أقرب نسخة دقيقة منك على بُعد $١٠^{١٠^{١٢٨}}$ سنوات ضوئية. ولأغراض المقارنة، تذكَّر أنَّ حافة الكون القابل للرصد تقع على بعد $١٠^{١١}$ سنوات ضوئية.[4]

أما النسخ غير الدقيقة، فسيكون ترتيبها أسهل، وهي أكثر إثارة للاهتمام. فربما توجد رقعة تحتوي على نسخة منك فيما عدا أنَّ لون شعرك مختلف، أو ربما تنتمي إلى جنس مختلف، أو تعيش في البيت المجاور، أو تعيش في بلد مختلف. أو ربما تكون رئيس وزراء المريخ. فهذه النسخ الشديدة الشبه بك أكثر انتشارًا من النسخ الدقيقة بدرجة كبيرة، لكنها لا تزال شديدة الندرة.

إننا لا نستطيع زيارة الأماكن التي تقع على بُعد بضع سنين ضوئية، فضلًا عن $١٠^{١٠^{١٢٨}}$ سنوات ضوئية؛ لذا يبدو أنَّ اختبار هذه النظرية علميًّا محال. ثم إنَّ تعريف

الرقعة يستبعد الصلات السببية بين الرقاع التي لا تتداخل؛ ولهذا لا تستطيع الذهاب من هنا إلى هناك. ربما يكون من الممكن اختبار إحدى النتائج النظرية، لكن الأمل في ذلك ضئيل، وسيتوقَّف على النظرية التي تأسس الاستدلال عليها.

يُعد الكون المتعدد المشهد مثيرًا للاهتمام على وجه الخصوص؛ لأنه قد يحل المعضلة الكونية المحيرة المتمثلة في الضبط الدقيق.

والفكرة في ذلك بسيطة. بالرغم من أنَّ احتمال وجود أي كون «بعينه» يتسم بالثوابت الأساسية الصحيحة تمامًا قد يكون ضئيلًا للغاية، فلن يكون ذلك عقبة في حالة وجودِ ما يكفي من الأكوان. إذا كانت الاحتمالات $١٠^{٤٧}$ مقابل واحد، فثمَّة احتمال جيد أن تحصل على الكون المناسب للحياة إذا صنعت $١٠^{٤٧}$ من الأكوان. وإذا صنعت عددًا أكبر، فستزيد احتمالية النجاح. وفي أي من مثل تلك الأكوان، في تلك الأكوان فحسب، يمكن للحياة أن تنشأ وتتطور وتصل إلى التساؤل عن «لماذا نحن هنا؟» وتكتشف مدى عدم احتمالية وقوعها، وتبدأ في القلق بشأن ذلك.

للوهلة الأولى، يبدو ذلك مشابهًا للمبدأ الإنساني الضعيف: الأكوان الوحيدة التي تستطيع الكائنات الموجودة فيها أن تسأل: «لماذا نحن هنا؟» هي تلك التي تجعل الوجود هنا ممكنًا. والرأي السائد أنَّ هذه الحقيقة وحدها لا تحل المعضلة تمامًا. ذلك أنها تطرح سؤالًا آخر: إذا لم يكن هنالك سوى كون واحد، فكيف اتخذ مثل ذلك الخيار غير المحتمل؟ غير أنَّ ذلك لا يمثل مشكلة في سياق الكون المتعدد المشهد. إذا صنعت ما يكفي من الأكوان العشوائية، يصبح ظهور الحياة في أحدها احتمالًا شبه مؤكد. يشبه ذلك ما يحدث في اليانصيب. فاحتمالية أن تفوز السيدة سميث في المستقبل في أي سحب محدَّد لليانصيب (في المملكة المتحدة، حتى التغييرات الحديثة) هي واحد من ١٤ مليون تقريبًا. بالرغم من ذلك، ملايين الأشخاص يلعبون اليانصيب؛ لذا فاحتمالية أنَّ «شخصًا ما» سيفوز أكبر كثيرًا، وهي تساوي احتمالين من ثلاثة احتمالات تقريبًا. (في ثلث المرات لا يفوز أحد على الإطلاق، ويُطبَّق خيار «الترحيل»؛ حيث تُضاف الجائزة إلى وعاء السحب التالي.)

وفي الكون المتعدد المشهد، تفوز الحياة باليانصيب الكوني من خلال شراء جميع التذاكر.

من الجانب التقني، يُعد الكون المتعدد المشهد هو نسخة نظرية الأوتار من الكون المتعدد التضخمي. ونظرية الأوتار هي محاولة لتوحيد النسبية مع ميكانيكا الكم من

خلال استبدال «أوتار» ضئيلة متعددة الأبعاد بالجسيمات النقطية. ليس ذلك مجال مناقشة التفاصيل لكن نظرية الأوتار تواجه مشكلة كبيرة، وهي أنه يوجد ما يقرب من ١٠⁵⁰⁰ طرق مختلفة لتشكيل نظرية الأوتار.[5] ينتج بعضها ثوابت أساسية شديدة الشبه بتلك الموجودة في كوننا، لكنَّ ذلك لا يحدث في معظمها. لو أنَّ ثمَّة طريقة سحرية لتحديد نسخة محددة من نظرية الأوتار، لتمكنا من التنبؤ بالثوابت الأساسية، لكننا لا نملك حتى الآن أي سبب يدعونا لتفضيل نسخة على أخرى.

إنَّ كون نظرية الأوتار المتعدد يسمح باستكشاف جميع الأكوان واحدًا تلو الآخر، يمكن تشبيه ذلك بعض الشيء بالزيجات الأحادية المتتالية. وإذا لوَّحت بيدي منظِّرك بالقوة الكافية، فقد يسمح اللايقين الكمومي بالانتقال العابر من إحدى نسخ نظرية الأوتار إلى أخرى، وبهذا يؤدي «الكون» مِشية السكران عبر فضاء جميع أكوان نظرية الأوتار. ولأنَّ الثوابت قريبة من الثوابت الموجودة في كوننا، يمكن للحياة أن تتطور. ويتصادف أنَّ تلك الثوابت الأساسية تنتج هي أيضًا أكوانًا طويلة الأجل للغاية ولها سمات كالثقوب السوداء. وبهذا، فإنَّ الأكوان التي تتغير على التوالي، غالبًا ما توجد في المواقع المثيرة للاهتمام حيث توجد كائنات مثلنا.

يطرح هذا سؤالًا أقل وضوحًا. ما السبب في ارتباط الملاءمة للحياة وطول الأجل معًا؟ لقد اقترح لي سمولين إجابة عن هذا السؤال في سياق الكون المتعدد التضخمي، وهي أنَّ الأكوان الجديدة التي تنبثق عبر الثقوب السوداء قد تتطور بالانتخاب الطبيعي، متجهةً نحو توليفة من الثوابت الأساسية التي لا تجعل الحياة ممكنة فحسب؛ بل تمنحها أيضًا كثيرًا من الوقت لكي تبدأ وتصبح أكثر تعقيدًا. إنها فكرة لطيفة لكنها لا توضح الكيفية التي يمكن أن يتنافس بها كونان مع أحدهما الآخر بحيث يظهر الانتخاب الدارويني.

يحظى الكون المتعدد المشهد بقدرٍ لا بأس به من التأييد، بالرغم من ذلك، فهو مثلما يقول لويس كارول: «مبدأ عظيم لكنه تافه».[6] يمكن لنسخة الكون المتعدد المشهد أن تفسر «أي شيء». فيمكن لكائن سيبراني شبه فلزي سباعي المجسات يعيش في كون يتخذ ثوابت أساسية مختلفة تمامًا، أن يقدِّم الشيء نفسه سببًا لوجود «كونه»، ولماذا هو يتسم بالضبط الدقيق للحياة السيبرانية شبه الفلزية. إذا كانت النظرية تتنبأ بجميع النتائج المحتملة، فكيف يمكنك اختبارها؟ أيمكن حقًّا أن نعتبرها نظرية علمية؟

لطالما كان جورج إليس متشككًا في أمر الكون المتعدد. كتب إليس عن الكون المتعدد التضخمي لكنه أضاف أنَّ ثمَّة ملاحظات مشابهة تنطبق على جميع الأنواع؛ فقال:[7]

> إنَّ قضية الكون المتعدد ليست حاسمة. والسبب الأساسي في ذلك هو المرونة الشديدة التي يتسم بها الاقتراح ... فنحن نفترض وجود عدد ضخم من الكيانات غير القابلة للرصد، أو ربما حتى عدد لا نهائي منها، لكي نفسِّر كونًا واحدًا موجودًا. إنَّ ذلك لا يتفق على الإطلاق مع قاعدة فيلسوف القرن الرابع عشر الإنجليزي، ويليام الأوكامي، التي تنص على أنَّ «الكيانات يجب ألا تتعدد دون ضرورة.»

ختم إليس كلامه بملاحظة أكثر إيجابية: «لا بأس على الإطلاق بالتخمينات الفلسفية القائمة على العلم، وهذا هو ما تمثله اقتراحات الكون المتعدد. غير أننا يجب أن نسميها باسمها.»

إنَّ الكون المتعدد الكمومي هو أقدم هذه النسخ، وكل ذلك بسبب إروين شرودينجر. القطة، أليس كذلك؟ أنت تعرف تلك القطة التي تكون حية وميتة في الوقت ذاته حتى تنظر لترى أيهما. على عكس الأكوان المتعددة الأخرى، توجد عوالم الكون المتعدد الكمومي المختلفة في الوقت نفسه معًا، وتشغل المكان والزمان نفسيهما. إنَّ كُتَّاب الخيال العلمي يحبون هذا النوع.

يكون التعايش المستقل ممكنًا في هذا الكون المتعدد؛ لأنَّ الحالات الكمومية يمكن أن «تتراكب»: تُضاف معًا. في الفيزياء الكلاسيكية، تفعل موجات المياه شيئًا مشابهًا: إذا تقاطع رتلان من الموجات معًا، فإنَّ قممهما تتحد معًا لتكوين قمم أكبر، أما حين تتقاطع قمة مع قاع، فإنَّ أحدهما يلغي الآخر. غير أنَّ هذا التأثير يتوسع كثيرًا في العالم الكمومي. فعلى سبيل المثال، قد يدور الجسيم في اتجاه عقارب الساعة أو عكسها (لا شك بأنَّ هذا المثال مبسط للغاية، لكنه يوصل الفكرة). حين تتراكب هذه الحالات، «لا» تلغي إحداها الأخرى. وإنما نحصل على جسيم يدور في الاتجاهين في الوقت نفسه.

إذا أجريت قياسًا حين يكون النظام في إحدى هذه الحالات المركبة، يحدث شيء لافت للنظر. ستحصل على إجابة محددة. وقد أدى هذا إلى الكثير من الجدالات بين الرواد الأوائل للنظرية الكمومية، وهدأ هذا الجدال في مؤتمر بالدنمارك حين اتفق معظمهم على أنَّ فعل

«رصد» النظام، يؤدي بطريقةٍ ما إلى «انهيار» الحالة إلى أحد المكونين. يُسمى هذا التأويل بتفسير كوبنهاجن.

لم يقتنع شرودينجر بهذا التفسير تمامًا، واخترع تجربة ذهنية ليشرح السبب. ضع قطةً في صندوق غير نفَّاذ، وضع معها ذرةً مشعةً وزجاجةَ غازٍ سامٍّ ومطرقة. صمِّم آلية تؤدي في حالة تحلل الذرة وانبعاث جسيم منها إلى تحطيم المطرقة للزجاجة؛ ومن ثمَّ قتل القطة بالغاز. أغلق الصندوق وانتظر.

بعد فترة من الوقت، تسأل: هل القطة حية أم ميتة؟

في الفيزياء الكلاسيكية (أي غير الكمومية)، إما أن تكون الإجابة بهذا أو ذاك، لكنك لا تستطيع تحديد ذلك حتى تفتح الصندوق. أما في الفيزياء الكمومية، فإنَّ حالة الذرة المشعة هي تراكب من «التحلل» و«عدم التحلل»، وهي تظل كذلك إلى أن ترصد الحالة بفتح الصندوق. وحينها تنهار الحالة على الفور إلى أحد الخيارين. أوضح شرودينجر أنَّ الأمر نفسه ينطبق على القطة التي يمكن اعتبارها نظامًا ضخمًا من الجسيمات الكمومية المتفاعلة. تضمن الآلية الموجودة داخل الصندوق أن تبقى القطة حية إذا لم تتحلل الذرة، وتضمن موتها إذا تحللت. ولهذا فلا بد أن تكون القطة حية وميتة في الوقت ذاته، وذلك حتى تفتح الصندوق وتؤدي إلى انهيار الدالة الموجية الخاصة بالقطة، وتعرف أيهما قد حدث.

في عام ١٩٥٧، طبَّق هيو إيفريت هذا التبرير المنطقي نفسه على الكون ككل، مقترحًا أنَّ ذلك قد يفسِّر كيفية انهيار الدالة الموجية. ولاحقًا، أطلق برايس دويت على اقتراح إيفريت، اسم تفسير العوالم المتعددة لميكانيكا الكم. فبالاستقراء من تجربة القطة، يكون الكون نفسه توليفة من جميع حالاته الكمومية الممكنة. بالرغم من ذلك، لا توجد طريقة في هذه الحالة لفتح الصندوق؛ إذ لا يوجد شيء خارج الكون. من ثمَّ؛ فلا يمكن لشيء أن يؤدي لانهيار الحالة الكمومية للكون. غير أنَّ الملاحظ الداخلي جزء من إحدى حالاته الكمومية؛ ولهذا لا يرى إلا الجزء المناظر من الدالة الموجية للكون. فالقطة الحية ترى ذرة لم تتحلل، أما القطة الميتة، هممم، فلا بد أن أمنح ذلك مزيدًا من التفكير.

باختصار، يرى كل ملاحظ موازٍ نفسَه يسكن واحدًا فقط من عدد ضخم من الأكوان الموازية التي توجد كلها في الوقت ذاته، لكن في حالات مختلفة. زار إيفريت نيلز بور في كوبنهاجن ليخبره بهذه الفكرة، لكنَّ بور غضب للغاية من اقتراح أنَّ الدالة الموجية الكمومية للكون لا تنهار ولا يمكن أن تنهار. قرَّر هو ومَن يشاركونه الرأي أنَّ إيفريت

لا يفهم ميكانيكا الكم، وقد قال ذلك بعبارات فظة. وصف إيفريت هذه الزيارة بأنها «منكوبة من البداية».

إنها فكرة غريبة للغاية، بالرغم من أنه يمكن صياغتها بطريقة رياضية منطقية. ولا يفيد أيضًا أنَّ تفسير العوالم المتعددة عادةً ما يُمثَّل في سياق أحداث تاريخية في محاولة مضللة لكي يكون مفهومًا. ففي الكون المكوِّن الذي نلاحظه أنا وأنت، خسر هتلر الحرب العالمية الثانية. بالرغم من ذلك، ثمَّة كون موازٍ آخر فاز فيه هتلر (حسنًا، هتلر آخر في الواقع، لكنَّ أحدًا لا يقول ذلك) بالحرب (حربٍ مختلفة أيضًا)، وتدرك نسختي ونسختك أنهما تعيشان في ذلك العالم. أو ربما متنا في الحرب، أو لم نولَد قطُّ، مَن يدري؟

يصرُّ العديد من الفيزيائيين على أنَّ الكون «كذلك بالفعل»، وأنهم يستطيعون إثبات ذلك. وهم يخبرونك عن تجارب على الإلكترونات. أو على الجزيئات مؤخرًا. غير أنَّ هدف شرودينجر كان توضيح أنَّ القطة ليست بإلكترون. إنَّ القطة بصفتها نظامًا ميكانيكيًّا كموميًّا، تتكوَّن من عدد ضخم للغاية من الجسيمات الكمومية. والتجارب التي تُجرى على جسيم واحد أو ١٠ أو حتى مليار، لا تخبرنا بأي شيء عن قطة. ولا تخبرنا بشيء أيضًا عن الكون.

انتشرت تجربة قطة شرودينجر انتشارًا واسعًا بين الفيزيائيين والفلاسفة، وأنتجت أعمالًا تحمل جميع أنواع الأسئلة التكميلية. لم لا نضع كاميرا داخل الصندوق أيضًا لتصويرِ ما يحدث، ثم نشاهد الفيلم بعد ذلك؟ كلا، لن ينجح ذلك؛ فحتى تفتح الصندوق ستصبح الكاميرا حينها في توليفة من «قطة ميتة مصورة» و«قطة حية مصورة». ألا تستطيع القطة ملاحظة حالتها؟ بلى إذا كانت حية، ونعم إذا كانت ميتة، لكن الملاحظ الخارجي سيظل عليه الانتظار حتى يُفتَح الصندوق. أعطِ القطة هاتفًا محمولًا، كلا، تلك فكرة سخيفة، ثم إنَّ «الهاتف» سيتراكب أيضًا. إنه صندوق غير نفاذ على أية حال. ولا بد أن يكون كذلك، وإلا استطعت استنتاج حالة القطة من الخارج.

لا توجد الصناديق غير النفاذة في الواقع. فما مدى صلاحية تجربة فكرية عن أحد المستحيلات؟ لنفترض أننا استبدلنا بالذرة الإشعاعية قنبلة ذرية إما أن تنفجر أو لا تنفجر. وفقًا للحجة المنطقية نفسها، فإننا لا نعرف أيهما قد حدث حتى نفتح الصندوق. سيكون الجيش مستعدًّا لفعل أي شيء من أجل الحصول على صندوق يظل ثابتًا حين تضع سلاحًا نوويًّا بداخله.

يذهب البعض إلى أبعد من ذلك، ويزعمون أنَّ الملاحظ لا بد أن يكون «بشريًّا» أو (كائنًا عاقلًا على الأقل)، وتلك سبة كبيرة لسلالة القطط. ويقترح البعض أنَّ الكون قد

أحضرنا إلى الوجود لأننا نستطيع ملاحظته، ومن ثمَّ نؤدي إلى انهيار موجته الدالية، ونحضره «هو» إلى الوجود. نحن هنا؛ لأننا نحن هنا، لأننا نحن هنا.

إنَّ هذه العلاقة السببية المعكوسة البارزة ترفع من أهمية البشرية، لكنها تتجاهل السمة التي دفعت بور إلى رفض نظرية إيفريت: في تفسير العوالم المتعددة «لا» تنهار الدالة الموجية للكون. يتناقض هذا مع مبدأ كوبرنيكوس وتفوح بالغطرسة. وهي أيضًا تغفل صلب الموضوع؛ فلغز قطة شرودنيجر عن الملاحظات لا الملاحِظين. وهو لا يناقش في حقيقة الأمر ما يحدث عند وقوع ملاحظة ما. وإنما يبحث عن «ماهية» الملاحظة.

تأتي الصياغة الرياضية لميكانيكا الكم في جانبين. يتمثَّل أحدهما في معادلة شرودينجر التي تُستخدَم في نمذجة الحالات الكمومية، وتتسم بخواص رياضية واضحة. أما الجانب الآخر فهو كيفية تمثيلنا للملاحظة. وفقًا للنظرية فإنَّها دالة رياضية. ستضع نظامًا كموميًّا في الدالة، وستظهر حالته، وهي نتيجة الملاحظة، في الطرف الآخر. وذلك مشابه تمامًا لما يحدث حين تدخل العدد ٢ في الدالة اللوغاريتمية، وينبثق منها لوغاريتم ٢. كل ذلك منظم وأنيق، لكنَّ ما يحدث بالفعل أنَّ حالة النظام تتفاعل مع حالة أجهزة القياس، وهي نظام كمومي بالغ التعقيد. إنَّ ذلك التفاعل معقَّد للغاية بدرجة لا تسمح بدراسته رياضيًّا بالتفصيل؛ ولهذا يُفترَض أنه ينكمش إلى دالة واحدة منظمة. بالرغم من ذلك، فلا يوجد سبب واحد يدعونا إلى افتراض أنَّ ذلك هو ما يحدث بالفعل، بينما تدعونا جميع الأسباب إلى التشكك في أنه ما يحدث.

إنَّ ما لدينا هو حالة من عدم التطابق بين تمثيل كمومي دقيق لعملية القياس لكنه يستعصي على الحل، وإضافة «مخصصة»، الدالة الافتراضية. لا عجب إذن في ظهور تفسيرات غريبة ومتناقضة. وتنتشر مشكلات مماثلة في جميع جوانب النظرية الكمومية، وهي لا تُلحظ في معظم الأحيان. ذلك أنَّ الجميع يركِّزون على المعادلات وكيفية حلها، بينما لا يفكر أحد في «الشروط الحدية» التي تمثل الجهاز أو الملاحظات.

يُعَد الصندوق العازل للقنابل النووية مثالًا على ذلك. وتُعد المرآة نصف المفضضة التي تعكس جزءًا من الضوء بينما تترك بقية الضوء يمر مباشرة من خلالها، مثالًا آخر. إنَّ العلماء الذين يجرون التجارب الكمومية يحبون هذه الأداة لأنها تعمل بمثابة فالق للأشعة؛ إذ تأخذ تيارًا من الفوتونات وتوزعها عشوائيًّا في اتجاهين مختلفين. وبعد أن تقوم الفوتونات بما أردتَ اختباره أيًّا كان، تجمعها من جديد لتقارن ما حدث. في

معادلات ميكانيكا الكم، تُعد المرآة نصف المفضضة جسمًا صافيًا ليس له أي تأثير على الفوتونات سوى إعادة توجيهها في زوايا قائمة باحتمالية تبلغ ٥٠٪. إنها تشبه وسادة طاولة البلياردو التي تؤدي إلى ارتداد الكرة بمرونة تامة في بعض الأحيان، أو تختفي في أحيان أخرى فتمر الكرة مباشرة عبرها.

غير أنَّ المرآة نصف المفضضة في العالم الفعلي تمثل نظامًا كموميًّا ضخمًا يتكوَّن من ذرات فضة مبعثرة على رقاقة من الزجاج. وحين يصطدم أحد الفوتونات بالمرآة، إما أن يرتد عن جسيم دون ذري في إحدى ذرات الفضة، وإما أن يخترقه. قد يرتد الفوتون في أي اتجاه، لا في اتجاه زاوية قائمة فحسب. بالرغم من أنَّ طبقة ذرات الفضة رقيقة، فهي أسمك من ذرة واحدة؛ لذا قد يصطدم بإحدى ذرات الفضة عميقًا، بصرف النظر عن التركيب الذري الفوضوي للغاية للزجاج. وعلى نحوٍ عجيب للغاية، حين تجتمع هذه التفاعلات معًا، إما أن ينعكس الفوتون أو يعبر دون تغيير. (توجد بعض الاحتمالات الأخرى، لكنها شديدة الندرة حتى إنه يمكن تجاهلها.) إذن فالواقع لا يشبه كرة البلياردو. إنما يشبه قيادة سيارة فوتونية إلى مدينةٍ ما من الشمال، والسماح لها بالتفاعل مع آلاف السيارات الأخرى، وبطريقة مدهشة، تخرج السيارة بعد ذلك إلى اتجاه الجنوب أو اتجاه الشرق، ويكون الاختيار عشوائيًّا. إنَّ هذا النظام المعقد من التفاعلات يُغفَل في النموذج النظيف المرتب. فكلُّ ما يصبح لدينا حينها هو فوتون ضبابي ومرآة صافية عاكسة على نحو عشوائي.

أجل أعرف أنه نموذج وأنه ناجح فيما يبدو. بالرغم من ذلك، فلا ينبغي أن تواصل طرح هذا النوع من التصورات مع الإصرار على أنَّ كلَّ ما تستخدمه هو معادلة شرودينجر.

مؤخرًا، صار العديد من الفيزيائيين يفكرون بشأن الملاحظات الكمومية، لكن من منظور حقيقي لميكانيكا الكم بدلًا من افتراض قيود غير واقعية تنتمي إلى الفيزياء الكلاسيكية. والحق أنَّ ما اكتشفوه يصوغ الأمر كله على نحوٍ أكثر منطقية.

أولًا، لا بد أن أعترف أنَّ حالات التراكب المشابهة لحالات القطة قد شُكِّلَت في المختبر لأنظمة كمومية أكبر كثيرًا. تتضمن الأمثلة بترتيب الحجم التقديري: فوتون، وأيون ذرة البيريليوم، وجزيء بوكمينستر فوليرين (٦٠ ذرة كربون مرتبة على شكل قفص مبتور عشريني الوجوه)، وتيار كهربي «يتكون من مليارات الإلكترونات» في «جهاز تداخل كمي فائق التوصيل» يُعرف اختصارًا باسم «سكويد». وجرى أيضًا وضع شوكة رنانة كهربية

ضغطية في تراكب من الحالات المهتزة وغير المهتزة. وبالرغم من أنَّ الأمر لم يصل إلى القطط بعد، لكنه تقدُّم ملحوظ وغير متوقع. وللاقتراب من إجراء هذه التجارب على الكائنات الحية، اقترح أوريول روميرو-إيسارت وزملاؤه في عام ٢٠٠٩، ابتكار فيروس إنفلونزا شرودينجر.[8] ضع أحد الفيروسات في فراغ، واخفض درجة حرارته إلى أن يصل لحالته الكمومية الأكثر انخفاضًا من الطاقة، وأغلق عليه بالليزر. يتسم فيروس الإنفلونزا بالقوة الكافية ليصمد في هذه الظروف، والمتوقع أن ينتهي به الحال في تراكب من تلك الحالة وحالة أخرى نشطة من الطاقة العالية.

إنَّ هذه التجربة لم تُنفَّذ بعد، لكن حتى إذا تمكَّن أحدهم من إجرائها بنجاح، فلا يمكن اعتبار الفيروس مكافئًا للقطة. فالحالات الكمومية للأجسام الكبيرة النطاق تختلف عن حالات الأجسام الصغيرة النطاق مثل الإلكترونات وأجهزة التداخل الكمي الفائق التوصيل؛ لأنَّ حالات التراكب في الأنظمة الكبيرة أكثر هشاشة بدرجة كبيرة. قد تستطيع وَضْع إلكترون في حالتَيْ دوران إحداهما باتجاه عقارب الساعة والأخرى عكس عقارب الساعة، إلى أجلٍ غير مسمًّى من خلال عزله عن العالم الخارجي. أما إذا حاولت فعل ذلك مع قطة، فإنَّ التراكب يتفكك: ينهار تركيبه الرياضي الدقيق سريعًا. وكلما زاد تعقيد النظام، زادت سرعة تفككه. والنتيجة أنه حتى في نموذج كمومي، تتصرف القطة وكأنها جسم كلاسيكي إلا أن تنظر إليها لوقت قصير لا يمكن ملاحظته. إنَّ مصير قطة شرودينجر ليس بأكثر غموضًا من معرفة هدية عيد الميلاد التي تلقيتها من العمة فيرا حتى تفتحها. أجل، هي دائمًا ما تُرسل إما جوارب أو وشاحًا، لكن هذا لا يعني أنَّ هديتها تراكب من الاثنين.

إنَّ تشريح الدالة الموجية الكمومية للكون إلى تراكب من السرديات البشرية — فوز هتلر أو خسارته — هو فكرة غير منطقية منذ البداية. فالحالات الكمومية لا تخبرنا بالقصص البشرية. ولو أنك استطعت النظر إلى الدالة الموجية للكون، لما تمكنت أيضًا من انتشال هتلر. حتى الجسيمات التي تشكله، ستستمر في التغير كلما تساقط شعره أو تصاعد الغبار على معطفه. وبالمثل، لا توجد طريقة نستنتج بها من الدالة الموجية الكمومية للقطة ما إذا كانت حية أم ميتة أم تحولت إلى صبارة.

حتى في إطار عمل ميكانيكا الكم، دائمًا ما توجد مشكلة رياضية مع النهج المعتاد لتناول مفارقة قطة شرودينجر. في عام ٢٠١٤، طور كلٌّ من جيكوف فوكزون، وأليكساندر

بوتابوف، وستانيسلو بودوسينوف[9] نهجًا تكميليًّا. تشير حساباتهم إلى أنه حتى حين «تكون» القطة في حالة متراكبة، فإنَّ الحالة التي تُرصَد عند فتح الصندوق، لها «نتائج قياس محددة ويمكن التنبؤ بها». واستنتجوا ما يلي: «وعلى عكس الآراء [الأخرى]، فإنَّ «النظر» إلى الناتج لا يغير شيئًا، سوى إخبار الملاحظ بما حدث بالفعل.» بعبارة أخرى، تكون القطة حية أو ميتة بالفعل، قبل أن يقوم أي شخص بفتح الصندوق، لكنَّ الملاحظ الخارجي لا يعرف أيهما في تلك الحالة.

يكمن صميم حساباتهم في اختلاف دقيق للغاية. يتخذ التمثيل المعتاد لحالة القطة المتراكبة ما يلي:

|قطة⟩ = |حية⟩ + |ميتة⟩

يمثل الرمزان |⟩ في هذه الحالة الطريقة التي يكتب بها الفيزيائيون حالة معينة؛[10] لذا يمكن قراءتها «الحالة الخاصة ب». لم أذكر بعض الثوابت (سعة الاحتمال) التي تتضاعف بها الحالات.

بالرغم من ذلك، فهذه الصيغة لا تتفق مع التطور الزمني للحالات الكمومية. فنموذج «جيراردي-ريميني-ويبَر»، وهو أسلوب رياضي لتحليل انهيار الموجة الدالية،[11] يستلزم تقديم الزمن بطريقة مباشرة. تمنع السببية الجمع بين الحالات التي تحدث في أوقات مختلفة؛ ولهذا ينبغي أن نعيد كتابة الحالة على النحو التالي:

|قطة في الزمن t⟩ = |قطة حية في الزمن t وذرة غير متحللة في الزمن t⟩
+ |قطة ميتة في الزمن t وذرة متحللة في الزمن t⟩

تُدعى تلك الحالة بالمصطلح الكمومي، حالة «متشابكة». فهي ليست تراكبًا من حالتين خالصتين مثل «قطة حية» أو «ذرة غير متحللة». وإنما هي تراكب من حالات مختلطة، حالة القطة «و» حالة الذرة، وهي ما يمثل الحالة المنهارة «لنظام» القطة/الذرة المقترن. وتخبرنا تلك الحالة المتشابكة أنه قبل فتح الصندوق، إما أن تكون الذرة قد تحللت بالفعل «و» قتلت القطة (هو أمر متوقع تمامًا)، أو أنَّ الذرة لم تتحلل ولم تقتل القطة. وذلك هو ما تتوقعه من نموذج كلاسيكي لعملية الملاحظة، ولا ينطوي على أية مفارقات.

في عام ٢٠١٥، قدَّم إيجور بيكوفسكي وماجدلينا زيخ، وفابيو كوستا، وكاسلاف برونكر، مكوِّنًا جديدًا؛ إذ اكتشفوا أنَّ الجاذبية تؤدي إلى تفكك التراكب بدرجة أسرع

كثيرًا. والسبب في هذا هو تمدُّد الزمن النسبوي، ذلك التأثير الذي يؤدي إلى تجمُّد الزمن عند أفق الحدث في الثقوب السوداء. وحتى مقدار التمدد الزمني الضئيل للغاية الناتج عن مجال جذبوي ضعيف، يتداخل مع التراكب الكمومي. إذن، فالجاذبية تكاد أن تفكك قطة شرودينجر على الفور إلى إحدى حالتين؛ «حية» أو «ميتة». وذلك ما لم تفترض أنَّ الصندوق لا يتأثر بالجاذبية، وهو أمر صعب للغاية، بسبب عدم وجود مادة تتسم بهذه الخاصية.

الأرجح أنه يوجد الكثير من وجهات النظر الأخرى بخصوص قطة شرودينجر، وتفسير العوالم المختلفة لميكانيكا الكم الذي يرتبط بها ارتباطًا وثيقًا، والأرجح أنَّ عددها أكثر من الفيزيائيين الكموميين أنفسهم. وقد ناقشت بضع محاولات فقط لحل المفارقة، مما يشير إلى أنَّ نموذج الكون المتعدد الكمومي أبعد ما يكون عن الاكتمال. وبهذا، يمكنك الاطمئنان إلى عدم وجود كون آخر موازٍ لهذا الكون، تعيش فيه نسخة أخرى منك، وفيه انتصر هتلر. ربما يكون ذلك «محتملًا»، لكن ميكانيكا الكم لا تقدِّم أسبابًا مقنعة للاعتقاد بأنَّ هذا صحيح. غير أنه «صحيح» في حالة الفوتون. وذلك وحده لافت للنظر.

لعلك أدركت ببلوغنا تلك المرحلة أنني متشكك بعض الشيء بشأن الأكوان المتعددة. إنني أحب الرياضيات التي تنطوي عليها، وهي تخلق حبكات مبتكرة في الخيال العلمي، لكنها تتضمن الكثير جدًّا من الافتراضات غير المدعومة بالأدلة. من بين النسخ التي ناقشتها الكون المتعدد المشهد الذي يتمتع بميزة عن غيره. وليس ذلك لأننا نمتلك دليلًا على وجوده بالفعل — أيًّا كان ما يعنيه ذلك — بل لأنه يحل فيما يبدو المسألة المزعجة المتمثلة في الضبط الدقيق غير المرجح على الإطلاق للثوابت الأساسية.

وذلك ينقلنا إلى الخيار الرابع.

يُعد الكون المتعدد المشهد تطرفًا فلسفيًّا. فهو يحاول حل سؤال واحد يحير في الوقت الحالي بضعة من البشر الضئيلي الأهمية الكونية بافتراض وجود جسم بالغ الاتساع والتعقيد على نحوٍ استثنائي يتجاوز الخبرة البشرية تمامًا. إنه يشبه علم كونيات متمركزًا حول الأرض، يدور فيه بقية الكون الضخم حول أرض مركزية مرة في اليوم. ذكر الفيزيائي بول شتاينهارت، الذي عمل على التضخم في بداياته، شيئًا مشابهًا عن الكون المتعدد التضخمي:[12] «من أجل تفسير الكون الوحيد البسيط الذي نستطيع رؤيته، تفترض فرضية الكون المتعدد التضخمي وجود مجموعة لا نهائية من الأكوان تتخذ درجات عشوائية من التعقيد، ولا نستطيع رؤيتها.»

سيكون من الأسهل أن نعترف بأننا لا نعرف سبب الضبط الدقيق. بالرغم من ذلك، فقد لا نحتاج إلى ذلك أصلًا بسبب وجود احتمال آخر. وهذا هو الخيار الرابع. فربما ضُخِّمَت مشكلة الضبط الدقيق للغاية، وربما هي لا توجد في واقع الأمر. وهذا هو الخيار الرابع. إذا كان هذا صحيحًا، فليست الأكوان المتعددة سوى تفاصيل زائدة غير ضرورية.

يستند هذا التبرير المنطقي على تحليل أكثر دقة للدليل المزعوم على الضبط الدقيق؛ ذلك الاحتمال الذي يبلغ ١٠^{-٤٧} والذي يمثل إمكانية وجود مجموعة الثوابت الأساسية الملائمة للحياة. تستلزم هذه العملية الحسابية بعض الافتراضات القوية. يتمثَّل أحدها في أنَّ الطريقة الوحيدة لصنع كونٍ ما هي اختيار ٢٦ ثابتًا لوضعها في معادلتنا الحالية. صحيح أنَّ هذه الثوابت تمثل في الرياضيات «معاملات» عددية تعدل المعادلات دون التأثير في بنائها الرياضي العام، وبحسب ما نعرفه، فإنَّ كل تعديل ينتج مجموعة صالحة من المعادلات التي تحدد أحد الأكوان. غير أننا لا نعرف ذلك في واقع الأمر. فنحن لم نرصد كونًا معدلًا قط.

بصفتي رياضيًّا، فإنني أهتم بالكثير من المعاملات الأخرى التي تندرج ضمنيًّا في المعادلات، لكنها لا تُكتَب أبدًا لأنها تساوي صفرًا في كوننا. لماذا لا تتغير تلك المعاملات أيضًا؟ بعبارة أخرى، ماذا لو وضعنا في المعادلات حدودًا إضافية تختلف عن تلك التي نكتبها الآن؟ إنَّ حدًّا إضافيًّا من هذا النوع يطرح المزيد من الضبط الدقيق الذي يجب تفسيره. لماذا «لا» تعتمد حالة الكون على إجمالي عدد النقانق الذي كان يُباع في سوق «سميثفيلد» في لندن عام ١٩٩٧؟ أو على الاشتقاق الثالث من المجال الكارمابومي، الذي لا يعرفه العلم حتى الآن؟

يا للهول! ثابتان إضافيان يجب أن تكون قيمتاهما قريبتين جدًّا جدًّا مما يحدث في هذا الكون.

من محدودية الخيال أن نظن أنَّ الطريقة الوحيدة لتشكيل أكوان جديدة هي تغيير الثوابت الأساسية المعروفة في معادلات النموذج الرائج حاليًّا. إنَّ ذلك أشبه بأن يتخيل سكان جزيرة في بحر جنوبي في القرن السادس عشر أنَّ الطريقة الوحيدة لتحسين الزراعة هي زرع نوع أفضل من جوز الهند.

بالرغم من ذلك، لنفترض حسن النية في المؤمنين بالضبط الدقيق، ونسلِّم بصحة هذا الافتراض. لا شك بأنَّ القيمة «١٠^{-٤٧}» ستظهر «حينها» وتستلزم تفسيرًا. وللإجابة عن ذلك السؤال، ينبغي أن نلِمَّ بخلفية عن الحسابات. تتمثَّل هذه الطريقة بصفة عامة

في تثبيت جميع الثوابت الكونية إلا واحدًا لمعرفةِ ما يحدث عند تغيير ذلك الثابت المحدد. بعد ذلك، نأخذ إحدى الظواهر المهمة في العالم الواقعي، مثل ذرةٍ ما، لنرى التأثير الذي تتركه القيمة الجديدة لذلك الثابت على الوصف القياسي للذرة. وبالفعل، تنهار الرياضيات المعتادة للذرة ما لم يكن التغير في الثابت صغيرًا جدًّا.

والآن، سنطبِّق الأمر نفسه على ثابت آخر. لنختر ثابتًا يتعلَّق بالنجوم هذه المرة. سنترك جميع الثوابت الأخرى بقيمتها الفعلية في هذا الكون، نغير ذلك الثابت المحدد. في هذه المرة، ستجد أنَّ النماذج المعتادة للنجوم تتوقف عن العمل ما لم يكن التغير في «ذلك» الثابت صغيرًا جدًّا. وعند الربط بين ذلك كله، نجد أنَّ تغيير أي ثابت بأكثر من مقدار ضئيل للغاية، يؤدي إلى «خلل» ما. نستنتج من هذا أنَّ الطريقة الوحيدة لتشكيل كون يتخذ السمات المهمة الموجودة في هذا الكون هي استخدام الثوابت نفسها تقريبًا التي توجد في هذا الكون. وبعد إجراء الحسابات، تطل القيمة «١٠^{-٤٧}» برأسها.

يبدو الأمر مقنعًا لا سيما إذا راجعت المعارف الفيزيائية والرياضية المدهشة التي تنطوي عليها الحسابات. في كتاب «انهيار الفوضى» المنشور عام ١٩٩٤، قدَّمت أنا وكوهين حجةً مماثلة يتضح فيها الخطأ المفاهيمي بدرجة أكبر. تخيَّل سيارةً ما، لنقل إنها سيارة «فورد فيستا». والآن تخيَّل أحد مكوناتها، لنقل إنها المسامير التي تمسك بالمحرك معًا، ولتتساءل عمَّا سيحدث إذا غيرت قطر المسامير «مع الإبقاء على كل شيء آخر ثابتًا». حسنًا، إذا كانت المسامير أسمك كثيرًا فإنها لن تدخل، وإذا كانت أرفع كثيرًا، فإنها لن تظل مكانها وتقع. نستنتج من هذا أنه لكي تكون السيارة صالحة للاستخدام، فلا بد أن يكون قطر المسامير قريبًا للغاية مما تجده في سيارة «فورد فيستا». ينطبق الأمر نفسه على العجلات: إذا غيَّرت حجمها فلن تتلاءم الإطارات، وينطبق أيضًا على الإطارات: إذا غيَّرت حجمها فلن تكون العجلات ملائمة، وينطبق أيضًا على شمعات الاشتعال وكل مسننة بعينها في التروس، وغير ذلك. إذا وضعت ذلك كله معًا فستكون احتمالية اختيار أجزاء يمكن أن تشكل سيارة أصغر من ١٠^{-٤٧}. لن تستطيع حتى أن تصنع عجلة.

ذلك أنه توجد سيارة واحدة ممكنة على وجه التحديد، ولا بد أن تكون سيارة «فورد فيستا».

والآن، قف على جانب الطريق وشاهد جميع السيارات الأخرى من نوع «فولكسفاجن» و«تويوتا» و«أودي» و«نيسان» و«بيجو» و«فولفو» وهي تمر.

ثمَّة شيء خاطئ بالتأكيد.

الخطأ هو تغيير الثوابت «كلٌّ على حدة».

إذا أردت بناء سيارة، فأنت لا تبدأ بتصميم ناجح بالفعل، ثم تغيِّر جميع أحجام المسامير مع ترك الصواميل على حالها. ولا تغير أيضًا أحجام الإطارات مع ترك أحجام العجلات ثابتة. ذلك جنون. فحين تغيِّر مواصفات مكون واحد، يكون لذلك آثار تلقائية غير مباشرة على المكونات الأخرى. ولكي تحصل على تصميم جديد لسيارة تعمل، فإنك تجري تغييرات منسقة على «الكثير» من القيم العددية.

لقد صادفت ردًّا واحدًا على ذلك النقد للضبط الدقيق يتلخص فيما يلي: «حسنًا، لكن إجراء الحسابات أصعب كثيرًا عند تغيير العديد من الثوابت.» أجل، هذا صحيح. غير أنَّ ذلك لا يبرِّر إجراء عملية حسابية أسهل إذا كانت العملية الحسابية «الخاطئة». إذا ذهبت إلى مصرفٍ ما وأردت معرفة الرصيد الموجود في حسابك فقال لك الموظف: «عذرًا، إنَّ معرفة «رصيدك» مهمة صعبة للغاية، لكن رصيد السيدة جونز ١٤٢ جنيهًا إسترلينيًّا»، هل سيرضيك ذلك؟

إضافةً إلى هذا عادةً ما تغفل حسابات الضبط الدقيق سؤالًا مهمًّا ومثيرًا للاهتمام: إذا كانت الفيزياء المعتادة تتوقف عن العمل عند تغيير بعض الثوابت، فما الذي يحدث «بدلًا من ذلك»؟ ربما يوجد شيءٌ ما يؤدي دورًا مشابهًا. في عام ٢٠٠٨، درس فريد آدامز هذه الاحتمالية فيما يتعلق بجزء أساسي من المشكلة، وهو تكوُّن النجوم.[13] (لا شك أنَّ النجوم ليست سوى جزء من العملية التي تعد الكون لأشكال الحياة التي تتسم بالذكاء. ويتناول فيكتور ستينجر العديد من المشكلات الأخرى في كتابه الذي يتسم بدقة تقديم الحجج «مغالطة الضبط الدقيق».[14] والنتيجة واحدة: «الضبط الدقيق مبالغة ضخمة». لا توجد سوى ثلاثة ثوابت هي التي تؤثِّر على نحوٍ ملحوظ في تكوُّن النجوم، وهي ثابت الجاذبية، وثابت البنية الدقيقة، والثابت الذي يحكم معدلات التفاعلات النووية. أما الثوابت الثلاثة والعشرون الأخرى، فهي لا تستلزم الضبط الدقيق على الإطلاق، ويمكن أن تتخذ أي قيمة دون حدوث أي مشكلة في ذلك السياق.

درس آدامز بعد ذلك جميع التوليفات الممكنة لتلك الثوابت الثلاثة المهمة، لكي يعرف متى تُنتج «نجومًا» يمكن أن تعمل. ما من سبب يدعونا إلى تحديد تعريف النجم بالسمات الدقيقة التي نجدها في كوننا. فأنت لن تنبهر بالضبط الدقيق إذا أخبرك أحدهم أنه تنبأ بأنَّ النجوم لا يمكن أن توجد، لكنَّ أجسامًا أخرى أسخن قليلًا وأكبر بمقدار ١٪، وهي أيضًا شديدة الشبه بنجومنا؛ يمكن أن توجد. ولهذا، يعرف آدامز النجوم بأنها أي جسم

تتماسك مكوناته معًا بفعل جاذبيته، ويكون مستقرًّا، ويبقى لفترة طويلة، ويستخدم التفاعلات النووية لإنتاج الطاقة. توضح حساباته أنَّ النجوم بهذا الوصف توجد في نطاق ضخم من الثوابت. إذا كان صانع الكون يختار الثوابت عشوائيًّا، فثمَّة احتمال بنسبة ٢٥٪ بوجود كون يمكن أن يصنع النجوم.[15]

وهذا لا يمثل ضبطًا دقيقًا. غير أنَّ النتائج التي توصَّل إليها آدامز أقوى حتى من ذلك. فلماذا لا نسمح بتصنيف أجسام أكثر غرابة في فئة «النجوم»؟ لا يزال من الممكن أن يسمح خرج طاقتها بتعزيز شكل من أشكال الحياة. ربما تأتي الطاقة من عمليات كمومية في الثقوب السوداء، أو تكتلات من المادة المظلمة التي تولِّد الطاقة بإفناء المادة العادية. والآن تزيد الاحتمالية إلى ٥٠٪. ففيما يتعلق بتكوُّن النجوم، لا يكافح كوننا احتمالات تبلغ ١٠ ملايين تريليون تريليون تريليون مقابل واحد فقط. إنها رمية «نقش» واحدة، وقد سقطت عملة الثوابت الكونية على هذا الاتجاه إلى الأعلى.

خاتمة

«الكون مكان كبير، ربما يكون الأكبر على الإطلاق.»

كيلجور تراوت (فيليب خوسيه فارمر)،
«فينوس على نصف الصدفة»

لقد أخذتنا رحلتنا الرياضية من سطح الأرض إلى أبعد نواحي الكون، ومن بداية الزمن إلى نهاية الكون. بدأت رحلتنا في أعماق ما قبل التاريخ، حين نظر البشر الأوائل إلى سماء الليل وتساءلوا عمَّا يحدث هناك بالأعلى. ولا يبدو أنَّ نهاية هذه الرحلة تلوح في الأفق؛ إذ كلما زادت معرفتنا عن الكون، زاد ما نعجز عن فهمه.

لقد تطورت الرياضيات مع تطوُّر علم الفلك وما يتعلق به من مجالات مثل الفيزياء النووية والفيزياء الفلكية والنظرية الكمومية والنسبية. يطرح العلم الأسئلة، وتحاول الرياضيات الإجابة عنها. وأحيانًا يحدث العكس وتتنبأ الاكتشافات الرياضية بظواهر جديدة. فقد أدت جهود نيوتن لصياغة قوانين الجاذبية والحركة إلى تحفيز نظرية المعادلات التفاضلية ومشكلة الأجسام «ن»؛ مما أدى إلى الإلهام بالحسابات التي تنبأت بوجود نبتون، والاضطراب الفوضوي للقمر «هايبريون».

ونتيجةً لهذا، صارت الرياضيات والعلوم، لا سيما علم الفلك، أكثر تعقيدًا؛ إذ يلهم كلٌّ منهما بأفكار جديدة في الآخر. كانت السجلات البابلية لحركة الكواكب تستلزم علمًا عالي الدقة. وكان نموذج بطليموس للنظام الشمسي يستند إلى هندسة الكرات والدوائر. واستلزمت نسخة كيبلر للنظام الشمسي المقاطع المخروطية التي وضعها علماء الهندسة اليونانيون. حين أعاد نيوتن صياغة الأمر كلِّه في صورة قانون كوني شامل، قدَّمه

باستخدام الهندسة المعقدة لكنَّ علم التفاضل والتكامل والمعادلات التفاضلية هي ما شكَّل تفكيره.

لقد اتضح أنَّ نهج المعادلات التفاضلية أكثر ملاءمة لتعقيدات الظواهر الفلكية. وبعد فهم حركة جسمين يوجد بينهما تجاذب متبادل، حاول علماء الفلك والرياضيات الانتقال إلى فهم الظاهرة نفسها في وجود ثلاثة أجسام أو أكثر. تعرقلت هذه المحاولة بفعلِ ما نعرفه الآن باسم الديناميكا الفوضوية، وأطلت الفوضى برأسها للمرة الأولى في مسألة الجسمين ونصف. غير أنَّ التقدم كان لا يزال ممكنًا. فألهمت أفكار بوانكاريه تأسيس مجال جديد تمامًا في الرياضيات هو الطوبولوجيا. وقد كان هو نفسه أحد البارزين في مراحل تطوره الأولى. يمكن وصف الطوبولوجيا بأنه علم الهندسة بمعنًى مرن للغاية.

لقد فتح السؤال البسيط «كيف تشرق الشمس؟» صندوق باندورا حين أدرك البشر أنه لو كانت الشمس تستخدم مصدرًا تقليديًّا من مصادر الطاقة، لكانت احترقت وصارت رمادًا منذ زمن طويل. فاكتشاف الفيزياء النووية يفسِّر الكيفية التي تتمكَّن بها النجوم من إنتاج الحرارة والضوء، مما أدَّى إلى تراكم التنبؤات الدقيقة بوجود وفرة في المجرة من جميع العناصر الكيميائية تقريبًا.

ألهمت ديناميكيات المجرات بأشكالها المميزة، البشر بنماذج ورؤًى جديدة، لكنها طرحت أيضًا معضلة ضخمة: منحنيات الدورات التي لا تتفق مع قانون نيوتن للجاذبية إلا أن تكون غالبية المادة الموجودة في الكون مختلفة تمامًا عن أي شيء لاحظناه قبل ذلك أو شكَّلناه في مسارعات الجسيمات (وذلك على حد زعم علماء الكونيات). أو ربما لا تكمن المشكلة في الرياضيات؛ بل في نموذج رياضي غير ملائم، وهو الاحتمال الذي بدأ بعض الرياضيين في تأمُّله.

حين خلق أينشتاين ثورة في الفيزياء وأراد أن يدخِل الجاذبية فيها أيضًا، ظهر نوع جديد من الهندسة لإنقاذه، وهو نظرية مشاعب ريمان التي انبثقت من النهج الجذري الذي تبنَّاه جاوس في معالجة الانحناء. تفسِّر نظرية النسبية العامة التي نتجت عن ذلك، التقدُّم المداري الشاذ للحضيض الشمسي لدى عطارد، وانحناء الضوء بفعل الشمس. حين طُبِّقَت النظرية على النجوم الضخمة، ظهرت سمات رياضية غريبة للحلول استرعت الانتباه لما نعرفه الآن بالثقوب السوداء. كان الكون يبدأ في أن يبدو غريبًا بالفعل.

وحين طُبِّقَت النسبية العامة على الكون بأكمله، بدا الكون أغرب وأغرب. فقد أدَّى اكتشاف هابِل لظاهرة انزياح المجرات نحو الأحمر، إلى تشكيل لومتر لنظرية البيضة

الكونية المنفجرة، والتي تُعرف أيضًا بالانفجار العظيم. كان فهم الانفجار العظيم يستلزم فيزياء جديدة ورياضيات جديدة، وطرقًا حسابية جديدة فعالة. ما بدا للوهلة الأولى إجابة مكتملة، بدأ ينهار مع جمع المزيد من البيانات، واستلزم ثلاث إضافات مختلفة هي التضخم والمادة المظلمة والطاقة المظلمة. يروِّج علماء الكونيات لهذه الإضافات بصفتها اكتشافات عميقة، وهو ما سيكون صحيحًا إذا اجتازت نظرياتهم معيار التدقيق، غير أنَّ كلًّا من هذه الإضافات يأتي بمشكلاته، ولا يُدعَم أيٌّ منها بتأكيد مستقل من الافتراضات الواسعة النطاق اللازمة لنجاحها.

يعمل العلماء باستمرار على تنقيح فهمهم للكون، وكل اكتشاف جديد يطرح أسئلة جديدة. ففي يونيو ٢٠١٦، استخدمت ناسا ووكالة الفضاء الأوروبية تلسكوب هابل لقياس المسافات إلى النجوم في ١٩ مجرة. وكانت النتائج التي حصل عليها فريق بقيادة آدم ريس، قد استخدمت طرقًا إحصائية عالية الدقة لمراجعة ثابت هابل ليزداد إلى ٧٣٫٢ كيلومترًا في الثانية لكل كيلو فرسخ فلكي.[1] معنى هذا أنَّ الكون يتمدد بدرجة أسرع بمقدار ٥–٩٪ عمَّا كان يُعتقد من قبل. وفقًا للنموذج القياسي في علم الكونيات، لا يتفق هذا الرقم مع الملاحظات المستقاة من خلفية الأمواج الميكروية الكونية التي قاسها «مسبار ويلكينسون لتباين الأشعة الميكروية»، و«مسبار بلانك» التابع لوكالة الفضاء الأوروبية. ربما تكون هذه النتيجة غير المتوقعة مفتاحًا جديدًا لطبيعة المادة المظلمة والطاقة المظلمة، أو علامة على عدم وجودهما وأنَّ تصورنا عن الكون يحتاج إلى المراجعة.

تلك هي الطريقة التي تتقدَّم بها العلوم الحقيقية في واقع الأمر. ثلاث خطوات إلى الأمام، وخطوتان إلى الخلف. أما الرياضيون، فهم يتمتعون برفاهية العيش في فقاعة منطقية؛ حيث «يبقى» الشيء صحيحًا، فور أن تثبت صحته. قد تتغير التفسيرات والبراهين، لكنَّ المبرهنات لا تُلغى بعد التوصل إلى اكتشافات أخرى. غير أنها قد تصبح عتيقة أو غير ذات صلة بالاهتمامات الحالية. أما العلم فهو شرطي على الدوام، وتقتصر صلاحيته على صلاحية الأدلة الحالية فحسب. واستجابة لمثل هذه الأدلة، يحتفظ العلماء بالحق في «تغيير آرائهم.»

وحتى حين نظن أننا نفهم شيئًا ما، تظهر بعض المشكلات غير المتوقعة. فمن الناحية النظرية، تُعد جميع التنويعات المحتملة لكوننا على القدر نفسه من المنطقية التي تتسم بها هذه التنويعة. حين بدا أنَّ الحسابات تشير إلى أنَّ معظم الاحتمالات المتنوعة لا تدعم الحياة، ولا حتى وجود الذرات، قام اللغز الفلسفي المتمثل في الضبط الدقيق، بمشهد

دخوله الكبير على الساحة. أدت محاولات حله إلى بعض الأفكار الإبداعية وإن كانت تخمينية، التي ابتكرها الفيزيائيون حتى الآن. بالرغم من ذلك، فليس أيٌّ منها بضروري، إذا اتضح أنَّ المشكلة بأكملها تنطوي على مغالطات، مثلما يشير التحليل الدقيق.

يتمثل المحور الأساسي لهذا الكتاب، في التعبير عن ضرورة التفكير الرياضي في علم الفلك والكونيات، وإظهار ما حقَّقه من نجاح مذهل. وحتى حين كنت أنتقد النظريات الشهيرة، بدأت بتفسير وجهة النظر التقليدية وتوضيح السبب في موافقة الكثيرين عليها. بالرغم من ذلك، حين يبدو أنه توجد أسباب منطقية لتأمُّل بدائل جديدة، لا سيما حين لا يكون التعامل مع هذه البدائل بجدية، فأنا أعتقد أنها جديرة بالطرح، حتى وإن كانت خلافية أو مرفوضة وفقًا للعديد من علماء الكونيات. أنا لا أدعوك إلى قبول مزاعم واثقة بحل العديد من ألغاز الكون، بينما يبقى الكثير من المعضلات دون حل. ومن ناحية أخرى، أرغب في شرح الحلول التقليدية أيضًا؛ فهي تطبيقات رائعة للرياضيات، وربما تكون صحيحة، وحتى إذا لم تكن صحيحة، فهي تمهِّد الطريق نحو شيء أفضل.

غالبًا ما تبدو البدائل جذرية: لا وجود للانفجار العظيم، المادة المظلمة محض سراب. بالرغم من ذلك، فقبل بضعة عقود فقط، لم يكن لأي من النظريتين أيٌّ مؤيدين على الإطلاق. إنَّ البحث عند الحدود البعيدة للمعرفة دائمًا ما يكون صعبًا، نحن لا نستطيع أن نحضر الكون إلى أحد المختبرات، ونضعه تحت المجهر، ثم نقطره لمعرفةِ ما يتكوَّن منه أو نعرضه للإجهاد لنرى ما ينكسر. ولهذا لا بد لنا من استخدام الاستدلال والخيال. وعلينا استخدام مَلَكاتنا النقدية أيضًا؛ لذا فقد أوليتُ تركيزًا أكثر من المعتاد للأفكار التي لا تعبِّر عن الرأي المعتاد. فتلك أجزاء صالحة من العملية العلمية أيضًا.

لقد أتينا بعشرات النظرات الخاطئة التي كانت تبدو منطقية قبل فترة ليست بالطويلة. الأرض هي مركز الكون. تشكَّلت الكواكب حين انتزع نجم عابر كتلة على شكل سيجار من الشمس. توجد كواكب أقرب من عطارد تدور بالشمس. لكوكب زحل آذان. الشمس هي النجم الوحيد الذي تدور به كواكب. تقبع المجرة في مركز الكون محاطة بفراغ لا نهائي. الكون موجود منذ الأزل وعلى الدوام، لكنَّ موادَّ جديدةً تشكلت في الفراغ بين النجمي. كانت هذه النظريات تحظى بتصديق واسع في زمانها، وكان معظمها يستند إلى أفضل الأدلة الموجودة حينها. الحق أنَّ بعضها كان سخيفًا على أية حال؛ فالعلماء يتبنون أفكارًا سخيفة في بعض الأحيان تعززها فيهم غريزة القطيع وحمية شبيهة بالحمية الدينية، لا الأدلة.

لست أرى سببًا يجعل النظريات الحالية التي نعتز بها أفضل مآلًا. ربما لم يتشكل القمر عن طريق اصطدام الأرض بجسم في حجم المريخ. ربما لم يحدث انفجار عظيم. ربما لا يكون الانزياح نحو الأحمر دليلًا على تمدد الكون. ربما لا يكون للثقوب السوداء وجود. ربما لم يحدث التضخم قط. ربما تكون المادة المظلمة خطأً. ربما تكون الحياة الفضائية مختلفة عن أي شيء صادفناه من قبل، أو ربما حتى عن أي شيء نتخيله.

ربما نعم.

وربما لا.

ستكون المتعة في الاكتشاف.

الوحدات والمصطلحات

الأجرام الوراء نبتونية: الكويكبات أو أيٌّ من الأجسام الصغيرة الأخرى التي تدور بالشمس على مسافة متوسطة أكبر من المسافة بين الشمس ونبتون (٣٠ وحدة فلكية).

الاحتجاب: حين يظهر أنَّ جسمًا سماويًّا يمر خلف آخر يخبئه. يُستخدَم المصطلح تحديدًا لوصف النجوم التي يحجبها القمر أو كوكبٌ ما.

اختلاف المنظر: نصف الاختلاف في الاتجاهات إلى نجمٍ ما من النقاط المعاكسة على مدار الأرض، وذلك على محيط بزوايا قائمة على الخط الواصل بين الشمس والنجم.

إشعاع الجسم الأسود: طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر من جسم معتم غير عاكس عند درجة حرارة ثابتة.

أشعة جاما: أحد أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي وهي تتكوَّن من فوتونات عالية الطاقة.

أفق الحدث: حد الثقب الأسود الذي لا يستطيع الضوء الإفلات منه.

الإلكترون فولت: وحدة الطاقة المستخدمة في فيزياء الجسيمات، وهي تساوي ١٫٦ × $١٠^{-١٩}$ جول. انظر الجول.

الانحراف المركزي: قياس مدى ضيق المدار الإهليلجي أو اتساعه. انظر الملاحظة ٢ في الفصل الأول.

الانحناء: قياس جوهري لاختلاف السطح أو المشعب عن الفضاء الإقليدي المسطح.

الانفجار العظيم: النظرية القائلة بأنَّ الكون نشأ في متفردة قبل ١٣٫٨ مليار عام.

انفجارات أشعة جاما: مصدر انفجارات مفاجئة من أشعة جاما، يعتقد العلماء أنها تنتمي إلى نوعين؛ تَكوُّن نجم نيوتروني أو ثقب أسود، أو اتحاد زوج من أنظمة النجوم النيوترونية الثنائية.

الإهليلج: منحنًى بيضاوي مغلق يتكوَّن بمط دائرة بالتساوي في اتجاه واحد.

التقدم المداري: بطء دوران المحور في مدار إهليلجي.

ثابت البنية الدقيقة: ثابت أساسي يصف قوة التفاعل بين الجسيمات المشحونة. يساوي هذا الثابت ٧,٢٩٧٣٥٢ × ١٠^-٣^. (وهو عدد لا بُعدي؛ أي أنه مستقل عن الوحدات والقياس.)

ثابت الجاذبية: ثابت التناسب في قانون نيوتن للجاذبية. يساوي هذا الثابت $6{,}674080 \times 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$.

ثابت بلانك: ثابت أساسي في ميكانيكا الكم، وهو يحدِّد المقدار الأدنى من الطاقة في موجة كهرومغناطيسية (وهو ثابت بلانك مضروبًا في التردد). قيمة هذا الثابت صغيرة للغاية، وهي تساوي ١,٠٥٤٥٧١×١٠^-٣٤^ جول-ثانية.

ثانية قوسية: ٦٠ ثانية = دقيقة واحدة.

الثقب الأسود: منطقة في الفضاء لا يستطيع الضوء الإفلات منها، وغالبًا ما تتكوَّن بسبب انهيار نجم ضخم تحت وطأة جاذبيته.

الجسم الأساسي: الجِرم الوالد الذي يدور حوله الجسم المعني. الجسم الأساسي للأرض هو الشمس، والجسم الأساسي للقمر هو الأرض.

جسيمات كوكبية: أجسام صغيرة يمكن أن تتراكم لتكوين الكواكب، ويُعتَقد أنها كانت منتشرة في النظام الشمسي المبكر.

الجول: وحدة طاقة تنتج واطًا واحدًا من القدرة في الثانية الواحدة. (ينتج القضيب الواحد في المدفأة الكهربائية ١٠٠٠ واط تقريبًا.)

جيجا إلكترون فولت: إحدى وحدات الطاقة المستخدمة في فيزياء الجسيمات. تساوي الواحدة منها مليار إلكترون فولت. انظر تعريف الإلكترون فولت.

الحضيض الشمسي: أقرب نقطة يكون فيها الكوكب من الشمس.

الخلفية الكونية الميكروية: إشعاع يتوزع بالتساوي تقريبًا تبلغ درجة حرارته ٣ درجات كلفنية، ويعتقد العلماء بصفة عامة أنه من بقايا الانفجار العظيم.

درجة: (في الزوايا) ٣٦٠ درجة تساوي دائرة كاملة.

«درجة الحرارة» الوحدات المستخدمة في هذا الكتاب هي المئوية وكلفن. تبدأ المئوية من الصفر (درجة تجمُّد الماء) إلى ١٠٠ (تحوُّل الماء إلى بخار). الكلفن هي الدرجة المئوية زائد ٢٧٣,١٦، وصفر كلفن (–٢٧٣,١٦ مئوية) هي أقل درجة حرارة ممكنة على الإطلاق؛ أي الصفر المطلق.

دقيقة قوسية: ٦٠ دقيقة = ١ درجة.

الرنين بين الدوران الذاتي والمداري: العلاقة الكسرية بين فترة دوران جسمٍ ما حول محوره، وفترة دورانه حول جسمه الأساسي.

الرنين: تطابق التوقيت بين فترتي تأثيرين متكررين حين يُعبَّر عنه بعلاقة كسرية بسيطة. انظر الملحوظة رقم (٦) من ملاحظات الفصل الثاني.

الزمكان: مشعب رباعي الأبعاد يتسم بثلاثة إحداثيات مكانية وإحداثي واحد للزمان.

زمن ليابونوف: النطاق الزمني الذي يكون النظام الديناميكي فوضويًّا خلاله. يزداد الزمن في حالة المسافة بين المسارات القريبة بمعامل e الذي يساوي ٢,٧١٨ تقريبًا. أحيانًا يُعوَّض عن المعامل e بالعدد ٢ أو ١٠. يتعلق هذا الزمن بأفق التنبؤ، الذي تصبح التنبؤات بعده غير جديرة بالثقة.

سرعة الضوء: تساوي ٢٩٩٧٩٢٤٥٨ مترًا في الثانية.

سنة ضوئية: المسافة التي يقطعها الضوء في عام، ٩,٤٦٠٥٢٨ × ١٠^١٥ أمتار، أو ٩,٤٦ تريليونات كيلومتر.

الطارة: سطح رياضي على شكل كعكة الدونَت الأمريكية (بثقب).

طيف: الكيفية التي يختلف بها مقدار الإشعاع الصادر من جسمٍ ما (نجم في العادة) في الأمواج الطولية. وأهم سمتين فيه هما القمم (خطوط الانبعاث) والقيعان (خطوط الامتصاص).

الفترة: الزمن الذي يتكرَّر فيه سلوكٌ ما بصفة دورية. من أمثلة ذلك، فترة دوران الكوكب حول نجمه (٣٦٥ يومًا تقريبًا للأرض) أو فترة الدوران المحوري (٢٤ ساعة للأرض).

الفرسخ الفلكي: المسافة إلى نجم يبلغ اختلاف منظره ثانية قوسية واحدة، وهي ٣,٢٦ سنوات ضوئية.

قانون تيتيوس-بوديه: المسافة بين الشمس وأي كوكب تساوي ٠,٠٧٥ × $٢^{ن}$ + ٠,٤ وحدة فلكية.

قانون ديرموت: تتناسب الفترة المدارية لأي قمر من أقمار الكوكب أيًّا كان ترتيبه تناسبًا طرديًّا مع أُس الثابت أيًّا كانت قيمته C^n. يمكن لأنظمة الأقمار المختلفة أن تتخذ ثوابت مختلفة.

قانون نيوتن للجاذبية: توجد بين أي جسمين في الكون قوة تجاذب تتناسب طرديًّا مع كتلتيهما، وعكسيًّا مع مربع المسافة بينهما. يُسمى ثابت التناسب بثابت الجاذبية.

القدر: القياس اللوغاريتمي للسطوع. القدر الظاهري هو السطوع كما يُرى من الأرض، والقدر المطلق هو السطوع كما يُرى من على مسافة ١٠ فراسخ فلكية (في حالة النجوم)، وعلى مسافة وحدة فلكية واحدة (في حالة الكويكبات والكواكب). تتسم الأجسام الأكثر سطوعًا بانخفاض قيمة القدر، والتي يمكن أن تكون سالبة. تبلغ قيمة القدر الظاهري للشمس –٢٧، وللبدر –١٣، ولكوكب الزهرة –٥، وأشد النجوم المرئية سطوعًا وهو «سيريس» –١,٥. يتناظر انخفاض القدر بقيمة ٥ درجات مع زيادة السطوع بمائة ضعف.

قمر خارجي: قمر طبيعي لكوكب يدور بنجم غير الشمس.

القمر: «الطبيعي» جسم أصغر يدور حول كوكبٍ ما مثل «قمر الأرض»، «الاصطناعي»: آلة من صنع الإنسان تدور حول الأرض أو غيرها من أجرام النظام الشمسي.

القنطور: جسم يشغل مدارًا يقطع مدار المدار الشمسي بين المشتري ونبتون.

قوانين كيبلر لحركة الكواكب:

(١) يدور الكوكب حول الشمس في قطع ناقص تحتل الشمس إحدى بؤرتيه.

(٢) يقطع الخط الواصل بين الشمس والكوكب مساحات متساوية في فترات زمنية متساوية.

(٣) يتناسب مربع فترة دوران الكوكب حول الشمس مع مكعب المسافة.

قوانين نيوتن للحركة:

(١) تستمر الأجسام في الحركة في خط مستقيم وبسرعة ثابتةٍ ما لم تؤثِّر عليها قوةٌ ما.
(٢) تسارع أي جسم مضروبًا في كتلته يساوي القوة المؤثرة عليه.
(٣) لكل فعل رد فعل مساوٍ له في المقدار ومضاد له في الاتجاه.

كلفن: انظر تعريف الدرجة.

كوكب خارجي: كوكب يدور بنجم غير الشمس.

الكويكب: جسم صخري أو جليدي صغير يدور حول الشمس، فيما بين المريخ والمشتري بصفة أساسية.

اللمعان: إجمالي الطاقة التي يشعُّها النجم لكل وحدة من الزمن. يُقاس اللمعان بالجول في الثانية (الواط). تبلغ قيمة لمعان الشمس ٣٫٨٤٦ × ١٠^٢٦ واط.

المادة المضادة: مادة تتكوَّن من الجسيمات المضادة، وهي تتسم بكتلة الجسيمات المعتادة نفسها، لكنها تتخذ شحنة معاكسة.

المحور الأصغر: المحور الأقصر في القطع الناقص.

المحور الأكبر: المحور الأطول في القطع الناقص.

مخروط الضوء: منطقة الزمكان التي يمكن الوصول إليها من حدث معيَّن عبر تتبُّع منحنًى زمني مغلق أو خط العالم.

المذنَّب: جسم ثلجي صغير ترتفع درجة حرارته حين يقترب من الشمس، فيظهر له غلاف جوي مرئي (ذؤابة)، وربما ذيل أيضًا، وذلك بفعل تدفُّق الغازات على الرياح الشمسية.

المشعب: فضاءٌ مستوٍ متعدد الأبعاد يشبه السطح لكنه يتخذ أيَّ عدد من الإحداثيات.

مفلطح: مسطح عند القطبين.

منحنى الضوء: تغيُّر خرج النجم من الإشعاع بمرور الزمن.

ميجا إلكترون فولت: إحدى وحدات الطاقة المستخدمة في فيزياء الجسيمات. تساوي الواحدة منها مليون إلكترون فولت. انظر تعريف الإلكترون فولت.

نصف القطر الأصغر: نصف طول المحور الأقصر في القطع الناقص.

نصف القطر الأكبر: نصف طول المحور الأطول في القطع الناقص.

النظير: شكل مختلف من العنصر الكيميائي يُميَّز بعدد النيوترونات الموجودة في ذرته.

الوحدة الفلكية: المسافة من الشمس إلى الأرض، وتساوي ١٤٩٥٩٧٨٧١ كيلومترًا.

ملاحظات ومراجع

مقدمة

(1) Mars Odyssey, Mars Express, MRO, Mars Orbiter Mission, and MAVEN.

(2) NASA's *Opportunity* and *Curiosity* rovers. The *Spirit* rover ceased functioning in 2011.

(3) 'This foolish idea of shooting at the Moon is an example of the absurd length to which vicious specialisation will carry scientists. To escape the Earth's gravitation a projectile needs a velocity of 7 miles per second. The thermal energy at this speed is 15,180 calories [per gram]. Hence the proposition appears to be basically impossible.' Alexander Bickerton, Chemistry Professor, 1926.

'I am bold enough to say that a man-made Moon voyage will never occur regardless of all scientific advances.' Lee De Forest, electronics inventor, 1957.

'There is no hope for the fanciful idea of reaching the Moon because of insurmountable barriers to escaping the Earth's gravity.' Forest Moulton, astronomer, 1932.

(4) In a 1920 editorial, the *New York Times* wrote: 'Professor Goddard … does not know the relation of action to re-action, and the need to have

something better than a vacuum against which to react.' Newton's third law of motion states that to every action there is an equal and opposite reaction. The reaction comes from conservation of momentum, and no medium to react *against* is required. Such a medium would impede progress, not assist it. To be fair, the newspaper apologised in 1969 when the *Apollo 11* astronauts were on their way to the Moon. To every publication there is an equal and opposite retraction.

(5) Nicolas Bourbaki is the pseudonym of an ever-changing group of mainly French mathematicians first formed in 1935, who wrote a long series of books reformulating mathematics on a general and abstract basis. This was great for research mathematics, because it unified the subject, sorted out basic concepts, and provided rigorous proofs. But the widespread adoption of a similar philosophy in the teaching of school mathematics, known as 'new maths' met with little success, and was, to say the least, controversial.

الفصل الأول: الجذب عن بُعد

(1) In 1726 Newton spent an evening dining with William Stukeley in London. In a document preserved in the archives of the Royal Society, whose archaic spelling I've preserved for period flavour, Stukeley wrote:

"After dinner, the weather being warm, we went into the garden & drank thea under the shade of some apple tree; only he & myself. Amid other discourse, he told me, he was just in the same situation, as when formerly the notion of gravitation came into his mind. Why shd that apple always descend perpendicularly to the ground, thought he to himself; occasion'd by the fall of an apple, as he sat in contemplative mood. Why shd it not go sideways, or upwards? But constantly to the Earth's centre? Assuredly the reason is, that the Earth draws it. There must be a drawing

power in matter. And the sum of the drawing power in the matter of the Earth must be in the Earth's centre, not in any side of the Earth. Therefore does this apple fall perpendicularly or towards the centre? If matter thus draws matter; it must be in proportion of its quantity. Therefore the apple draws the Earth, as well as the Earth draws the apple."

Other sources also confirm that Newton told this story, but none of this proves the story true. Newton might have invented it to explain his ideas. A still extant tree – Flower of Kent, a cooking apple, at Woolsthorpe Manor – is said to be the one from which the apple fell.

(2) If an ellipse has major radius a and minor radius b, then the focus lies at a distance $\sqrt{a^2 - b^2}$ from the centre. The eccentricity is $\varepsilon = f/a\sqrt{1 - b^2/a^2}$.

(3) A. Koyré. An unpublished letter of Robert Hooke to Isaac Newton, *Isis* **43** (1952) 312–337.

(4) A. Chenciner and R. Montgomery. A remarkable periodic solution of the three-body problem in the case of equal masses, *Ann. Math.* **152** (2000) 881–901.

An animation, and further information about similar types of orbit, is at: http://www.scholarpedia.org/article/N-body_choreographies.

(5) C. Simó. New families of solutions in *N*-body problems, *Proc. European Congr. Math.*, Barcelona, 2000.

(6) E. Oks. Stable conic-helical orbits of planets around binary stars: analytical results, *Astrophys. J.* **804** (2015) 106.

(7) Newton put it this way in a letter to Richard Bentley, written in 1692 or 1693: "It is inconceivable that inanimate Matter should, without the Mediation of something else, which is not material, operate upon, and affect other matter without mutual Contact … That one body may act upon another at a distance thro' a Vacuum, without the Mediation of any thing else … is to me so great an Absurdity that I believe no Man who has in

philosophical Matters a competent Faculty of thinking can ever fall into it."

(8) That's slightly simplistic. Passing *through* lightspeed is what's forbidden. Nothing currently moving slower than light can speed up to become faster than light; if anything happens to be moving faster than light it can't decelerate to become slower than light. Particles like this are called tachyons: they're entirely hypothetical.

(9) In a letter of 1907 to his friend Conrad Habicht, Einstein wrote that he was thinking about 'a relativistic theory of the gravitational law with which I hope to account for the still unexplained secular change in the perihelion motion of Mercury'. His first significant attempts began in 1911.

(10) Nowadays we combine Einstein's equations into a single tensor equation (with ten components – a symmetric 4-tensor). But "field equations" remains the standard name.

الفصل الثاني: انهيار السديم الشمسي

(1) The oldest minerals found in meteorites, modern traces of the first solid material in the pre-solar nebula, are 4.5682 billion years old.

(2) He wrote it in 1662–3, but postponed publication because of the Inquisition. It appeared shortly after his death.

(3) A proper definition requires vectors.

(4) H. Levison, K. Kretke, and M. Duncan. Growing the gas-giant planets by the gradual accumulation of pebbles, *Nature* **524** (2015) 322–324.

(5) I. Stewart. The second law of gravitics and the fourth law of thermodynamics, in *From Complexity to Life* (ed. N. H. Gregsen), Oxford University Press, 2003, pp. 114–150.

(6) In this book the notation p:q for a resonance means that the first body mentioned goes round p times while the second goes round q

times. Their *periods* are therefore in the ratio q/p. On the other hand their *frequencies* are in the ratio p/q. Some authors use the opposite convention; others use the notation “p/q resonance”. Reversing the order of the bodies turns a $p{:}q$ resonance into a $q{:}p$ resonance.

(7) Venus doesn’t have old craters because its surface was reshaped by volcanism less than a hundred million years ago. The planets from Jupiter outwards are gas and ice giants, and all we can see is their upper atmosphere. But many of their moons have craters – some new, some old. *New Horizons* revealed that Pluto and its moon Charon have fewer craters than expected.

(8) K. Batygin and G. Laughlin. On the dynamical stability of the solar system, *Astrophys. J.* **683** (2008) 1207–1216.

(9) J. Laskar and M. Gastineau. Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth, *Nature* **459** (2009) 817–819.

(10) G. Laughlin. Planetary science: The Solar System’s extended shelf life, *Nature* **459** (2009) 781–782.

الفصل الثالث: قمر متقلب

(1) The chemistry of uranium deposits at Oklo, Gabon, suggests that in the Precambrian they constituted a natural fission reactor.

(2) R. C. Paniello, J. M. D. Day, and F. Moynier. Zinc isotopic evidence for the origin of the Moon, *Nature* **490** (2012) 376–379.

(3) A. G. W. Cameron and W. R. Ward. The origin of the Moon, *Abstr. Lunar Planet. Sci. Conf.* **7** (1976) 120–122.

(4) W. Benz, W.L. Slattery, and A.G.W. Cameron. The origin of the moon and the single impact hypothesis I, *Icarus* **66** (1986) 515–535.

W. Benz, W.L. Slattery, and A.G.W. Cameron. The origin of the moon and the single impact hypothesis II, *Icarus* **71** (1987) 30–45.

W. Benz, A.G.W. Cameron, and H.J. Melosh. The origin of the moon and the single impact hypothesis III, *Icarus* **81** (1989) 113–131.

(5) R. M. Canup and E. Asphaug. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation, *Nature* **412** (2001) 708–712.

(6) A. Reufer, M. M. M. Meier, and W. Benz. A hit-and-run giant impact scenario, *Icarus* **221** (2012) 296–299.

(7) J. Zhang, N. Dauphas, A.M. Davis, I. Leya, and A. Fedkin. The proto-Earth as a significant source of lunar material, *Nature Geosci.* **5** (2012) 251–255.

(8) R. M. Canup, Simulations of a late lunar-forming impact, *Icarus* **168** (2004) 433–456.

(9) A. Mastrobuono-Battisti, H. B. Perets, and S.N. Raymond. A primordial origin for the compositional similarity between the Earth and the Moon, *Nature* **520** (2015) 212–215.

الفصل الرابع: كون الساعة الآلية

(1) See note 6 of Chapter 2 for why we don't call it a 3:5 resonance.

(2) Dermott's law, an empirical formula for the orbital period of satellites in the solar system, was identified by Stanley Dermott in the 1960s. It takes the form $T(n) = T(0)C^n$, where $n = 1, 2, 3, 4, \ldots$ Here $T(n)$ is the orbital period of the nth satellite, $T(0)$ is a constant of the order of days, and C is a constant of the satellite system in question. Specific values are: *Jupiter*: $T(0) = 0.444$ days, $C = 2.0$. *Saturn*: $T(0) = 0.462$ days, $C = 1.59$. *Uranus*: $T(0) = 0.488$ days, $C = 2.24$.

S. F. Dermott. On the origin of commensurabilities in the solar system II: the orbital period relation, *Mon. Not. RAS* **141** (1968) 363–376.

S. F. Dermott. On the origin of commensurabilities in the solar system III: the resonant structure of the solar system, *Mon. Not. RAS* **142** (1969) 143–149.

(3) F. Graner and B. Dubrulle. Titius–Bode laws in the solar system. Part I: Scale invariance explains everything, *Astron. & Astrophys.* **282** (1994) 262–268.

B. Dubrulle and F. Graner. Titius–Bode laws in the solar system. Part II: Build your own law from disk models, *Astron. & Astrophys.* **282** (1994) 269–276.

(4) Derived from 'QB_{1-0}', after (15760) 1992 QB_1, the first TNO discovered.

(5) It's tricky to measure the diameter of Pluto from Earth, even using the Hubble telescope, because it has a thin atmosphere that makes its edges fuzzy. Eris has no atmosphere.

(6) Propositions 43–45 of Book I of *Philosophiae Naturalis Principia* M*athematica.*

(7) A. J. Steffl, N. J. Cunningham, A. B. Shinn, and S. A. Stern. A search for Vulcanoids with the STEREO heliospheric imager, *Icarus* 233 (2013) 48–56.

الفصل الخامس: الشرطة السماوية

(1) Wigner's remark is often misunderstood. It's easy to explain the *effectiveness* of mathematics. Much of it is motivated by real-world problems, so it's no surprise when it solves those problems. The important word in Wigner's phrase is "unreasonable". He was referring to the way mathematics invented for one purpose often turns out to be useful in a totally different, unexpected area. Simple examples are Greek geometry of conic sections, turning up in planetary orbits two thousand years later, or Renaissance speculations about imaginary numbers, now central to mathematical physics and engineering. This widespread phenomenon can't be explained away so easily.

(2) Suppose, for simplicity, that all asteroids lie in the same plane – which isn't too far from reality for most. The asteroid belt lies between 2.2 and 3.3 AU from the Sun, that is, about 320 million and 480 million kilometres. Projected into the plane of the ecliptic, the total area occupied by the asteroid belt is $\pi(480^2 - 320^2)$ *trillion* square kilometres, that is, 4×10^{17} km^2. Shared among 150 million rocks this gives an area of 8.2×10^8 km^2 per rock. That's the same area as a circle of diameter 58,000 km. If the asteroids are roughly uniformly distributed, which is good enough for government work, that's the typical distance between neighbouring asteroids.

(3) M. Moons and A. Morbidelli. Secular resonances inside meanmotion commensurabilities: the 4/1, 3/1, 5/2 and 7/3 cases, *Icarus* **114** (1995) 33–50.

M. Moons, A. Morbidelli, and F. Migliorini. Dynamical structure of the 2/1 commensurability with Jupiter and the origin of the resonant asteroids, *Icarus* **135** (1998) 458–468.

(4) An animation showing the relationship between the five Lagrangian points and the gravitational potential is at https://en.wikipedia.org/wiki/File:Lagrangian_points_equipotential.gif.

(5) See the animation at https://www.exploremars.org/trojan-asteroids-around-jupiter-explained.

(6) F. A. Franklin. Hilda asteroids as possible probes of Jovian migration, *Astron. J.* **128** (2004) 1391–1406.

(7) http://www.solstation.com/stars/jupiter.html.

الفصل السادس: الكوكب الذي ابتلع أطفاله

(1) P. Goldreich and S. Tremaine. Towards a theory for the Uranian rings, *Nature* **277** (1979) 97–99.

(2) M. Kenworthy and E. Mamajek. Modeling giant extrasolar ring systems in eclipse and the case of J1407b: sculpting by exomoons? arXiv:1501.05652 (2015).

(3) F. Braga-Rivas and 63 others. A ring system detected around Centaur (10199) Chariklo, *Nature* **508** (2014) 72–75.

الفصل السابع: نجوم كوزيمو

(1) E. J. Rivera, G. Laughlin, R. P. Butler, S. S. Vogt, N. Haghighipour, and S. Meschiari. The Lick-Carnegie exoplanet survey: a Uranus-mass fourth planet for GJ 876 in an extrasolar Laplace configuration, *Astrophys. J.* **719** (2010) 890–899.

(2) B. E. Schmidt, D. D. Blankenship, G. W. Patterson, and P. M. Schenk. Active formation of 'chaos terrain' over shallow subsurface water on Europa, *Nature* **479** (2011) 502–505.

(3) P. C. Thomas, R. Tajeddine, M. S. Tiscareno, J. A. Burns, J. Joseph, T. J. Loredo, P. Helfenstein, and C. Porco. Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean, *Icarus* (2015) in press; doi:10,1016/j.icarus.2015.08.037.

(4) S. Charnoz, J. Salmon, and A. Crida. The recent formation of Saturn's moonlets from viscous spreading of the main rings, *Nature* **465** (2010) 752–754.

الفصل الثامن: رحلة على مذنَّب

(1) M. Massironi and 58 others. Two independent and primitive envelopes of the bilobate nucleus of comet 67P, *Nature* **526** (2015) 402–405.

(2) A. Bieler and 33 others. Abundant molecular oxygen in the coma of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko, *Nature* **526** (2015) 678–681.

(3) P. Ward and D. Brownlee. *Rare Earth*, Springer, New York, 2000.

(4) J. Horner and B. W. Jones. Jupiter – friend or foe? I: The asteroids, *Int. J. Astrobiol.* **7** (2008) 251–261.

الفصل التاسع: الفوضى في الكون

(1) See the video at: http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2015/24/video/a/.

(2) J. R. Buchler, T. Serre, and Z. Kolláth. A chaotic pulsating star: the case of R Scuti, *Phys. Rev. Lett.* **73** (1995) 842–845.

(3) Strictly, "dice" is the plural and "die" is the singular, but in language as she is actually spoke, almost everyone talks of "a dice". I no longer see any point in fighting this, but I'm not using the word out of ignorance. I'm still fighting a rearguard action on usages such as "the team are", but deep down I know I've lost that one too. I've also stopped trying to tell greengrocers the difference between the plural and the possessive, though I was sorely tempted to have a quiet chat with the bloke up the road whose van bears the sign: REMOVAL'S.

(4) Nonetheless, a 6 has the same probability as any other value, for a fair dice. In the long run, the numbers of 6s should get arbitrarily close to 1/6 of the number of throws. But how this happens is instructive. If at some stage there have been, say, 100 more throws of a 6 than anything else, a 6 doesn't become more likely. The dice just keeps churning out more and more numbers. After, say, a hundred million more throws, that extra 100 affects the proportion of 6s by only one part in a million. Deviations aren't cancelled out because the dice "knows" it's thrown too many 6s. They're diluted by new data, generated by a dice that has no memory.

(5) Dynamically, a dice is a solid cube, and its motion is chaotic because the edges and corners "stretch" the dynamics. But there's another source

of randomness in dice: initial conditions. How you hold the dice in your hand, and how you release it, randomise the result anyway.

(6) Lorenz didn't call it a butterfly, though he did say something similar about a seagull. Someone else came up with the butterfly for the title of a public lecture Lorenz gave in 1972. And what Lorenz originally had in mind probably wasn't *this* butterfly effect, but a subtler one. See: T. Palmer. The real butterfly effect, *Nonlinearity* **27** (2014) R123–R141.

None of that affects this discussion, and what I've described is what we now mean by 'butterfly effect'. It's real, it's characteristic of chaos, but it's subtle.

(7) V. Hoffmann, S. L. Grimm, B. Moore, and J. Stadel. Chaos in terrestrial planet formation, *Mon. Not. RAS* (2015); arXiv: 1508.00917.

(8) A. Milani and P. Farinella. The age of the Veritas asteroid family deduced by chaotic chronology, *Nature* **370** (1994) 40–42.

(9) June Barrow-Green. *Poincaré and the Three Body Problem*, American Mathematical Society, Providence, 1997.

(10) M. R. Showalter and D. P. Hamilton. Resonant interactions and chaotic rotation of Pluto's small moons, *Nature* **522** (2015) 45–49.

(11) J. Wisdom, S. J. Peale, and F. Mignard. The chaotic rotation of Hyperion, *Icarus* **58** (1984) 137–152.

(12) K = *Kreide*, German for 'chalk', referring to the Cretaceous, and T = Tertiary. Why do scientists do this kind of thing? Beats me.

(13) M. A. Richards and nine others. Triggering of the largest Deccan eruptions by the Chicxulub impact, *GSA Bull.* (2015), doi: 10.1130/B31167.1.

(14) W. F. Bottke, D. Vokrouhlický, and D. Nesvorný. An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor, *Nature* **449** (2007) 48–53.

الفصل العاشر: طريق ما بين الكواكب السريع

(1) M. Minovitch. A method for determining interplanetary free-fall reconnaissance trajectories, *JPL Tech. Memo*. TM-312–130 (1961) 38–44.

(2) M. Lo and S. Ross. SURFing the solar system: invariant manifolds and the dynamics of the solar system, *JPL IOM* 312/97, 1997.

M. Lo and S. Ross. The Lunar L1 gateway: portal to the stars and beyond, *AIAA Space 2001 Conf.*, Albuquerque, 2001.

(3) http://sci.esa.int/where_is_rosetta/ has a dramatic animation of this roundabout path.

(4) One cause (among many) of World War I was the assassination of the Austrian Archduke Franz Ferdinand on a visit to Sarajevo. Six assassins made a failed attempt with a grenade. Later one of them, Gavrilo Princip, shot him dead with a pistol, along with his wife Sophie. Initial reaction by the populace was virtually non-existent, but the Austrian government encouraged rioting against Serbs in Sarajevo, which escalated.

(5) W. S. Koon, M. W. Lo, J. E. Marsden, and S. D. Ross. The Genesis trajectory and heteroclinic connections, *Astrodynamics* **103** (1999) 2327–2343.

الفصل الحادي عشر: كرات عظيمة من النيران

(1) Strictly speaking, this term refers to total energy output, but that’s closely related to intrinsic brightness.

(2) An animation of stellar evolution across the Hertzsprung–Russell diagram can be found at http://spiff.rit.edu/classes/phys230/lectures/star_age/evol_hr.swf.

(3) F. Hoyle. Synthesis of the elements from hydrogen, *Mon. Not. RAS* **106** (1946) 343–383.

(4) E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, and F. Hoyle. Synthesis of the elements in stars, *Rev. Mod. Phys.* **29** (1957) 547–650.

(5) A. J. Korn, F. Grundahl, O. Richard, P. S. Barklem, L. Mashonkina, R. Collet, N. Piskunov, and B. Gustafsson. A probable stellar solution to the cosmological lithium discrepancy, *Nature* **442** (2006) 657–659.

(6) F. Hoyle. On nuclear reactions occurring in very hot stars: the synthesis of the elements between carbon and nickel, *Astrophys. J. Suppl.* **1** (1954) 121–146.

(7) F. Hoyle. The universe: past and present reflections, *Eng. & Sci.* (November 1981) 8–12.

(8) G. H. Miller and 12 others. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks, *Geophys. Res. Lett.* **39** (2012) L02708.

(9) H. W. Babcock. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle, *Astrophys. J.* **133** (1961) 572–587.

(10) E. Nesme-Ribes, S. L. Baliunas, and D. Sokoloff. The stellar dynamo, *Scientific American* (August 1996) 30–36.

For mathematical details and more recent work with more realistic models, see: M. Proctor. Dynamo action and the Sun, *EAS Publ. Ser.* **21** (2006) 241–273.

الفصل الثاني عشر: نهر السماء العظيم

(1) That is, $M(r) = r\upsilon(r)^2/G$. So $\upsilon(r) = \sqrt{GM(r)/r}$. Here $M(r)$ is the mass out to radius r, $\upsilon(r)$ is the rotational velocity of stars at radius r, and G is the gravitational constant.

الفصل الثالث عشر: عوالم فضائية

(1) X. Dumusque and 10 others. An Earth-mass planet orbiting α Centauri B, *Nature* **491** (2012) 207–211.

(2) V. Rajpaul, S. Aigrain, and S. J. Roberts. Ghost in the time series: no planet for Alpha Cen B, arXiv:1510.05598; *Mon. Not. RAS*, in press.

(3) Z. K. Berta-Thompson and 20 others. A rocky planet transiting a nearby low-mass star, *Nature* **527** (2015) 204–207.

(4) "Earthlike" here means a rocky world, with much the same size and mass as the Earth, in an orbit that would allow water to exist as a liquid without any special extra conditions. Later we require oxygen as well.

(5) E. Thommes, S. Matsumura, and F. Rasio. Gas disks to gas giants: Simulating the birth of planetary systems, *Nature* **321** (2008) 814–817.

(6) M. Hippke and D. Angerhausen. A statistical search for a population of exo-Trojans in the Kepler dataset, ArXiv:1508.00427 (2015).

(7) In *Evolving the Alien* Cohen and I propose that what really counts is *extelligence*: the ability of intelligent beings to pool their knowledge in a way that all can access. The Internet is an example. It takes extelligence to build starships.

(8) M. Lachmann, M. E. J. Newman, and C. Moore. The physical limits of communication, Working paper **99-07-054**, Santa Fe Institute 2000.

(9) I. N. Stewart. Uninhabitable zone, *Nature* **524** (2015) 26.

(10) P. S. Behroozi and M. Peeples. On the history and future of cosmic planet formation, *Mon. Not. RAS* (2015); arXiv: 1508.01202.

(11) D. Sasselov and D. Valencia. Planets we could call home, *Scientific American* **303** (August 2010) 38–45.

(12) S. A. Benner, A. Ricardo, and M. A. Carrigan. Is there a common chemical model for life in the universe? *Current Opinion in Chemical Biology* **8** (2004) 676–680.

(13) J. Stevenson, J. Lunine, and P. Clancy. Membrane alternatives in worlds without oxygen: Creation of an azotosome, *Science Advances* **1** (2015) e1400067.

(14) J. Cohen and I. Stewart. *Evolving the Alien*, Ebury Press, London, 2002.

(15) W. Bains. Many chemistries could be used to build living systems, *Astrobiology* **4** (2004) 137–167.

(16) J. von Neumann. *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana, 1966.

الفصل الرابع عشر: نجوم مظلمة

(1) In units that make the speed of light equal to 1, say years for time and light years for space.

(2) R. Penrose. Conformal treatment of infinity, in *Relativity, Groups and Topology* (ed. C. de Witt and B. de Witt), Gordon and Breach, New York, 1964, pp. 563–584; *Gen. Rel. Grav.* **43** (2011) 901–922.

(3) Animations of what it would look like when passing through these wormholes can be found at http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/penrose.html.

(4) B. L. Webster and P. Murdin. Cygnus X-1 – a spectroscopic binary with a heavy companion?, *Nature* **235** (1972) 37–38.

H. L. Shipman, Z. Yu, and Y. W. Du. The implausible history of triple star models for Cygnus X-1: Evidence for a black hole, *Astrophys. Lett.* **16** (1975) 9–12.

(5) P. Mazur and E. Mottola. Gravitational condensate stars: An alternative to black holes, arXiv:gr-qc/0109035 (2001).

الفصل الخامس عشر: خصلات وفراغات

(1) Colin Stuart. When worlds collide, *New Scientist* (24 October 2015) 30–33.

(2) You may object that "currently" has no meaning because relativity implies that events need not occur simultaneously for all observers. That's true, but when I say "currently" I'm referring to *my* frame of reference, with me as observer. I can conceptually set distant clocks by making changes of one year per light year; viewed from here, they will all be synchronised. More generally, observers in "comoving" frames experience simultaneity the way we would expect in classical physics.

(3) N. J. Cornish, D. N. Spergel, and G. D. Starkman. Circles in the sky: finding topology with the microwave background radiation, *Classical and Quantum Gravity* **15** (1998) 2657–2670.

J. R. Weeks. Reconstructing the global topology of the universe from the cosmic microwave background, *Classical and Quantum Gravity* **15** (1998) 2599–2604.

الفصل السادس عشر: البيضة الكونية

(1) Less than that! According to NASA it was 12% of a pixel.

(2) Based on Type Ia supernovae, temperature fluctuations in the CMB, and the correlation function of galaxies, the universe has an estimated age of 13.798 ± 0.037 billion years. See Planck collaboration (numerous authors). Planck 2013 results XVI: Cosmological parameters, *Astron. & Astrophys.* **571** (2014); arXiv:1303.5076.

(3) M. Alcubierre. The warp drive: hyper-fast travel within general relativity, *Classical and Quantum Gravity* **11** (1994). L73–L77.

S. Krasnikov. The quantum inequalities do not forbid spacetime shortcuts, *Phys. Rev. D* **67** (2003) 104013.

(4) See Note 2 of Chapter 15 on simultaneity in a relativistic universe.

الفصل السابع عشر: الانتفاخ الكبير

(1) The current figure for the temperature is 2.72548 ± 0.00057 K, see D. J. Fixsen. The temperature of the cosmic microwave background, *Astrophys. J.* **707** (2009) 916–920.

Other figures mentioned in the text are historical estimates, now obsolete.

(2) This phrase is reused from Terry Pratchett, Ian Stewart, and Jack Cohen. *The Science of Discworld IV: Judgement Day*, Ebury, London, 2013.

(3) Penrose's work is reported in: Paul Davies. *The Mind of God*, Simon & Schuster, New York, 1992.

(4) G. F. R. Ellis. Patchy solutions, *Nature* **452** (2008) 158–161.

G. F. R. Ellis. The universe seen at different scales, *Phys. Lett.* A **347** (2005) 38–46.

(5) T. Buchert. Dark energy from structure: a status report, *T. Gen. Rel. Grav.* **40** (2008) 467–527.

(6) J. Smoller and B. Temple. A one parameter family of expanding wave solutions of the Einstein equations that induces an anomalous acceleration into the standard model of cosmology, arXiv:0901.1639.

(7) R. R. Caldwell. A gravitational puzzle, *Phil. Trans. R. Soc. London* A **369** (2011) 4998–5002.

(8) R. Durrer. What do we really know about dark energy? *Phil. Trans. R. Soc. London* A **369** (2011) 5102–5114.

(9) Marcus Chown. End of the beginning, *New Scientist* (2 July 2005) 30–35.

(10) D. J. Fixsen. The temperature of the cosmic microwave background, *Astrophys. J.* **707** (2009) 916–920.

(11) The stars in galaxies are bound together by gravity, which is thought to counteract the expansion.

(12) S. Das, Quantum Raychaudhuri equation, *Phys. Rev.* D **89** (2014) 084068.

A. F. Ali and S. Das. Cosmology from quantum potential, *Phys. Lett.* B **741** (2015) 276–279.

(13) Jan Conrad. Don't cry wolf, *Nature* **523** (2015) 27–28.

الفصل الثامن عشر: الجانب المظلم

(1) Quasi-autonomous non-governmental organisation.

(2) K. N. Abazajian and E. Keeley. A bright gamma-ray galactic center excess and dark dwarfs: strong tension for dark matter annihilation despite Milky Way halo profile and diffuse emission uncertainties, arXiv: 1510.06424 (2015).

(3) G. R. Ruchti and 28 others. The Gaia-ESO Survey: a quiescent Milky Way with no significant dark/stellar accreted disc, *Mon. Not. RAS* **450** (2015) 2874–2887.

(4) S. Clark. Mystery of the missing matter, *New Scientist* (23 April 2011) 32–35.

G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk. Particle dark matter: evidence, candidates and constraints, *Phys. Rep.* **405** (2005) 279–390.

(5) Newton's second law of motion is $F = ma$, where F = force, m = mass, a = acceleration. MOND replaces this by $F = \mu(a/a_0)ma$, where a_0 is a new fundamental constant that determines the acceleration below which Newton's law ceases to apply. The term $\mu(x)$is an unspecified function that tends to 1 as x becomes large, in agreement with Newton's law, but to x when x is small, which models observed galactic rotation curves.

(6) J. D. Bekenstein, Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm, *Physical Review* D **70** (2004) 083509.

(7) D. Clowe, M. Bradač, A. H. Gonzalez, M. Markevitch, S. W. Randall, C. Jones, and D. Zaritsky. A direct empirical proof of the existence of dark matter, *Astrophys. J. Lett.* **648** (2006) L109.

(8) http://www.astro.umd.edu/~ssm/mond/moti_bullet.html.

(9) S. Clark. Mystery of the missing matter, *New Scientist* (23 April 2011) 32–35.

(10) J. M. Ripalda. Time reversal and negative energies in general relativity, arXiv: gr-qc/9906012 (1999).

(11) See the papers listed at http://msp.warwick.ac.uk/~cpr/paradigm/.

(12) D. G. Saari. Mathematics and the 'dark matter' puzzle, *Am. Math. Mon.* **122** (2015) 407–423.

(13) The phrase "the exception proves the rule" is widely trotted out to dismiss awkward exceptions. I've never understood why people do this, other than as a debating ploy. It makes no sense. The word "prove" in that context originally had the meaning "test" – just as we still *prove* bread dough; that is, test to see if it's the right consistency. (See en.wikipedia.org/wiki/Exception_that_proves_the_rule.) The phrase goes back to ancient Rome, in the legal principle *exceptio probat regulam in casibus non exceptis* (the exception confirms the rule in cases not excepted). Which means that if your rule has exceptions, you need a different rule. That does make sense. Modern usage omits the second half, producing nonsense.

الفصل التاسع عشر: خارج الكون

(1) The *truly* fundamental constants are specific combinations of these quantities that don't depend on the units of measurement: 'dimensionless constants' that are pure numbers. The fine structure constant is like that.

The numerical value of the speed of light does depend on the units, but we know how to convert the number if we use different units. Nothing I say depends on this distinction.

(2) B. Greene. *The Hidden Reality*, Knopf, New York, 2011.

(3) What matters is that there's some fixed number that's bigger than the number of states of any patch. Exact equality isn't required.

(4) Numbers with huge exponents like these behave rather strangely. If you look on the web you'll find that the nearest exact copy of you is about $10^{10^{128}}$ *metres* away. I replaced that with light years, which are much bigger than metres. But actually, changing the units makes very little difference to the *exponent*, because $10^{10^{128}}$ metres is $10^{10^{128}-11}$ light years, and the exponent $10^{10^{128}-11}$ is a 129-digit number, just like 10^{128}. Their ratio is 1.000…00011 with 125 zeros.

(5) B. Greene. *The Hidden Reality*, Knopf, New York, 2011, p. 154.

(6) L. Carroll. *The Hunting of the Snark*, online free at https://www.gutenberg.org/files/13/13-h/13-h.htm.

(7) G. F. R. Ellis. Does the multiverse really exist? *Sci. Am.* **305** (August 2011) 38–43.

(8) O. Romero-Isart, M. L. Juan, R. Quidant, and J. I. Cirac. Toward quantum superposition of living organisms, *New J. Phys.* **12** (2010) 033015.

(9) J. Foukzon, A. A. Potapov, and S. A. Podosenov. Schrödinger's cat paradox resolution using GRW collapse model, *Int. J. Recent Adv. Phys.* **3** (2014) 17–30.

(10) Known as a "ket" vector in Dirac's formalism for quantum mechanics. The right-hand end of a brac*ket*, OK? Mathematically, it's a vector rather than a dual vector.

(11) A. Bassi, K. Lochan, S. Satin, T. P. Singh, and H. Ulbricht. Models of wave-function collapse, underlying theories, and experimental tests, *Rev. Mod. Phys.* **85** (2013) 471.

(12) J. Horgan. Physicist slams cosmic theory he helped conceive, *Sci. Am.* (1 December 2014); http://blogs.scientificamerican.com/cross-check/physicist-slams-cosmic-theory-he-helped-conceive/.

(13) F. C. Adams. Stars in other universes: stellar structure with different fundamental constants, *J. Cosmol. Astroparticle Phys.* **08** (2008) 010.

(14) V. Stenger. *The Fallacy of Fine-Tuning*, Prometheus, Amherst, 2011.

(15) That is, on a log/log scale and in a specific but wide range of values, the region of parameter space for which stars can form has about one quarter the area of the whole space. This is a rough-and-ready measure, but it's comparable to what fine-tuning proponents do. The point isn't the 25%: it's that any sensible calculation of the likelihood makes it far bigger than 10^{-47}.

خاتمة

(1) Adam G. Reiss and 14 others. A 2.4% determination of the local value of the Hubble constant, http://hubblesite.org/pubinfo/pdf/2016/17/pdf/pdf.

حقوق نشر الصور

نُشِرَت الصور والرسوم الواردة بعد الحصول على الإذن من الجهات التالية:

صور بالأبيض والأسود

Atacama Large Millimeter Array, p. 33; E. Athanassoula, M. Romero-Gómez, A. Bosma & J. J. Masdemont. 'Rings and spirals in barred galaxies – II. Ring and spiral morphology', *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 400 (2009) 1706–20, p. 183; brucegary.net/XO1/x.htm, p. 191; ESA, p. 2; M. Harsoula & C. Kalapotharakos. 'Orbital structure in *N*-body models of barred-spiral galaxies', Mon. Not. RAS 394 (2009)1605–19, p. 182 (bottom); M. Harsoula, C. Kalapotharakos & G. Contopoulos. 'Asymptotic orbits in barred spiral galaxies', *Mon. Not. RAS* 411 (2011) 1111–26, p. 180; M. Hippke & D. Angerhausen. 'A statistical search for a population of exo-Trojans in the Kepler dataset', ArXiv:1508.00427 (2015), p. 193; W. S. Koon, M. Lo, S. Ross & J. Marsden, pp. 144, 145; C. D. Murray & S. F. Dermott, *Solar System Dynamics*, (Cambridge University Press 1999), p. 90; NASA, pp. 4, 89, 98, 103, 116, 117, 139, 173 (left), 178, 197, 249; M. Proctor. Dynamo action and the Sun, *EAS Publications Series* 21 (2006) 241–73, p. 167; N. Voglis, P. Tsoutsis & C. Efthymiopoulos. 'Invariant manifolds, phase correlations of chaotic orbits and the spiral structure of galaxies', *Mon. Not. RAS* 373 (2006) 280–94, p.

182 (top); Wikimedia commons, pp. 77, 147, 152, 155, 161, 165, 173 (right), 177, 185 (right); J. Wisdom, S. J. Peale & F. Mignard. ‘The chaotic rotation of Hyperion’, *Icarus* 58 (1984) 137–52, p. 136; www.forestwander.com/2010/07/milky-way-galaxy-summit-lake-wv/ p. 173 (top).

صور ملونة

Pl. 1 NASA/JHUAPL/SwRI; Pl. 2 NASA/JHUAPL/SwRI; Pl. 3 NASA/JPL/University of Arizona; Pl. 4 NASA/JPL/DLR; Pl. 5 NASA/JPL/ Space Science Institute; Pl. 6 NASA; Pl. 7 NASA/SDO; Pl. 8 M. Lemke and C. S. Jeffery; Pl. 9 NGC; Pl. 10 Hubble Heritage Team, ESA, NASA; Pl. 11 https://www.eso.org/public/outreach/copyright/; Pl. 12 Andrew Fruchter (STScI) et al., WFPC2, HST, NASA – NASA; Pl. 13 ‘Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and Quasars’ Volker Springel, Simon D. M. White, Adrian Jenkins, Carlos S. Frenk, Naoki Yoshida, Liang Gao, Julio Navarro, Robert Thacker, Darren Croton, John Helly, John A. Peacock, Shaun Cole, Peter Thomas, Hugh Couchman, August Evrard, Joerg Colberg & Frazer Pearce, 2005, Nature, 435, 629 © Springel et al. (2005).

بالرغم من أنَّ المؤلف والناشرين قد بذلوا كل جهد ممكن للتواصل مع مالكي حقوق الملكية الفكرية للصور والرسومات، فإنهم سيكونون ممتنين لتلقي أية معلومات بشأن الصور والرسومات التي لم يتمكنوا من تتبع حقوق ملكيتها، وسيسرهم القيام بالتعديلات في الإصدارات القادمة.


هنداوي